

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Porovnání řezných sil při kopírovacím frézování

Comparison of Cutting Forces During the Copy Milling

Student:

Michal Gargulák

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.

Ostrava 2017

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Zadání bakalářské práce

Student:

Michal Gargulák

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2303R002 Strojírenská technologie

Téma:

Porovnání řezných sil při kopírovacím frézování
Comparison of Cutting Forces During the Copy Milling

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Analýza navrženého prototypu a vybrané konkurence v oblasti kopírovacího frézování.
3. Návrh kontroly a měření nástrojů.
4. Příprava experimentálního obrábění.
5. Zpracování naměřených dat a jejich vyhodnocení.
6. Závěr a doporučení.

Seznam doporučené odborné literatury:

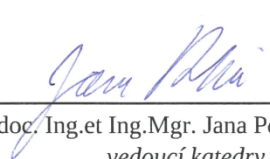
- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [2] HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Brno : MM Publishing Praha, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [3] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábění*. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [4] SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2005. 651. p. ISBN 0-19-514206-3.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017


doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

Tato práce byla vypracována se souhlasem společnosti Pramet Tools, s.r.o. v Šumperku.

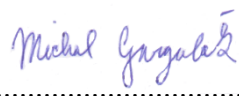
V Ostravě 15. 5. 2017

.....
Michael Gargalaš
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 15. 5. 2017

.....


podpis

Jméno a příjmení autora práce: Michal Gargulák

Adresa trvalého pobytu autora práce: Petrov nad Desnou 263, 788 14 Rapotín

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

GARGULÁK, M. *Porovnání řezných sil při kopírovacím frézování: Bakalářská práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2017, 57 s. Vedoucí práce Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.

Bakalářská práce se zabývá problematikou porovnání řezných sil při kopírovacím frézování. Úvodní část se věnuje teorii frézování, metodám měření řezných sil, konstrukci nástrojů a jejich geometrii. Experimentální část je věnována popisu stroje, nástrojů, řezným podmínkám. Řezné síly jsou měřeny na piezoelektrickém dynamometru KISTLER typu 9265A a vyhodnoceny za pomoci trojitého nábojového zesilovače KISTLER typu 5006. V závěru jsou vyhodnoceny a shrnuty poznatky experimentální zkoušky.

Klíčová slova: kopírovací frézování, fréza, řezné síly, společnost Pramet Tools, s.r.o.

ANNOTATION TO BACHELOR THESIS

GARGULÁK, M. *Comparsion of Cutting Forces During the Copy Milling: Bachelor thesis.* Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2017, 57 p. Thesis head: Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.

The bachelor thesis engages in issues to comparsion of cutting forces during the copy milling. Introductory part dedicates to theory of milling, measuring methods of cutting forces, construction tools and their geometry. In experimental part we pay attention to discribe machines, tools and milling conditions. Cutting forces are measured by piezoelectric dynamometer KISTLER, type 9265A and evaluated through by triple amplifier KISTLER, type 5006. Last of all there are evaluated and summarized pieces of knowledges of experimental testing.

Keywords: copy milling, cutter, cutting forces, company Pramet Tools, s.r.o.

Obsah

Seznam zkratk a symbolů.....	8
Úvod.....	10
1 Obecná charakteristika kopírovacího frézování	11
1.1 Kopírovací frézování.....	11
1.2 Nástroje pro kopírovací frézování.....	12
1.2.1 Modulární hlavičky.....	12
1.2.2 Kruhové VBD	12
1.3 Řezné síly při frézování	13
1.4 Měření řezných sil.....	14
1.4.1 Přímé měření sil a momentů	14
1.4.2 Nepřímé měření sil a momentů.....	18
1.5 Rozdělení obráběných materiálů.....	18
1.6 Metody povlakování.....	20
1.6.1 Metoda PVD	20
1.6.2 Metoda CVD.....	20
1.7 Opatření nástroje a jeho trvanlivost	21
2 Geometrie nástrojů a jejich konstrukce	24
2.1 Geometrie obráběcích nástrojů	24
2.2 Úhly nástroje při frézování.....	24
2.3 Charakteristika VBD	25
3 Popis testovaných nástrojů.....	28
3.1 Nástroj 25E3R032M12-SRC10-C-P01 a testované VBD.....	28
3.2 Nástroj TERY 325-M12-10 a testované VBD	29
3.3 Nástroj 7713VR10SA025Z3R35 a testované VBD.....	30
4 Experimentální zkouška.....	31
4.1 Strojní vybavení	31
4.2 Příslušenství k experimentální části	32
4.3 Měření řezných sil.....	33
5 Vyhodnocení experimentální zkoušky.....	37
5.1 Měření řezných sil VBD geometrie -F	37
5.1.1 Maximální naměřená síla jednoho zubu	37
5.1.2 Naměřené složky řezných sil v rozsahu posuvů	39

5.2	Měření řezných sil VBD geometrie -M	40
5.2.1	Maximální naměřená síla jednoho zubu	40
5.2.2	Naměřené složky řezných sil v rozsahu posuvů	42
Závěr.....		44
Seznam použité literatury.....		47
Seznam příloh.....		49

Seznam zkratk a symbolů

Zkratky	Popis	Jednotky
A ₅	minimální tažnost	[%]
A _D	průřez třísky	[mm ²]
C	kapacita	[F]
C _{Fe}	konstanta, vyjadřující vliv obráběného materiálu	[-]
CVD	chemický způsob povlakování	[-]
D	průměr	[mm]
D _a	průměr součásti	[mm]
D _i	vnitřní průměr součásti	[mm]
D _w	průměr obrobku	[mm]
F	síla řezání	[N]
F _c	řezná složka síly řezání	[N]
F _{cN}	kolmá řezná síla řezání	[N]
F _f	posuvová složka síly řezání	[N]
F _{fN}	kolmá posuvová síla řezání	[N]
F _{n max}	normálová složka síly	[N]
F _p	pasivní složka síly řezání	[N]
F _{t max}	tangenciální složka síly	[N]
F _{z max}	axiální složka síly	[N]
HRC	tvrdost dle Rockwella	[-]
KV	minimální nárazová práce	[J]
L	indukčnost	[H]
P _c	celkový výkon obráběcího stroje	[W]
P _o	výkon za chodu na prázdno	[W]
P _{už}	užitkový výkon	[W]
PVD	fyzikální způsob povlakování	[-]
R	odpor	[Ω]
R _e	minimální mez kluzu	[MPa]
R _m	mez pevnosti v tahu	[MPa]
SK	slinutý karbid	[-]
VBD	vyměnitelná břitová destička	[-]
a _p	axiální hloubka řezu	[mm]
a _e	šířka záběru	[mm]
f _{min}	minimální posuv	[mm·min ⁻¹]
f _z	posuv na zub	[mm]
k _c	měrná síla řezání	[MPa]
n	otáčky	[min ⁻¹]
v _c	řezná rychlost	[m·s ⁻¹]

v_f	posuvová rychlost	$[\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}]$
x	exponent vlivu tloušťky třísky	$[-]$
γ_f	úhel čela nástroje v rovině boční	$[\circ]$
γ_o	úhel čela nástroje v ortogonální rovině	$[\circ]$
γ_p	úhel čela nástroje v rovině zadní	$[\circ]$
κ_r	úhel nastavení hlavního ostří	$[\circ]$
λ_s	úhel sklonu ostří	$[\circ]$
φ	úhel posuvového pohybu	$[\circ]$

Úvod

V současnosti se klade velký důraz na vysokou produktivitu, minimalizování nákladů, zvyšování životnosti nástrojů a dodržování předepsané kvality výrobků. K dosažení těchto vlastností je zapotřebí klást vysoké požadavky na řezné nástroje a na celkový proces řezání během obrábění, který je doprovázen tvorbou zatěžujících sil. Důležitým faktorem, kromě znalosti technologie obrábění, jenž se musí před každým procesem zvážit, je rozlišení vlastností materiálu. Volba správných parametrů a řezných podmínek je velmi důležitá.

Nezbytným předpokladem k určení vhodnosti technologie obrábění je znalost velikosti a charakteru řezných sil. Pro soustavu stroj-nástroj-obrobek je zapotřebí dosáhnout minimálních řezných sil a tím zamezit velkému přenosu tepla do nástroje. V současnosti existují různé metody, kterými lze řezné síly změřit a vyhodnotit. Díky těmto aspektům vzniká řada experimentálních zkoušek s cílem zvýšit životnost nástroje, stroje a dosažení maximální ekonomické efektivnosti výroby.

Téma bakalářské práce bylo vypsáno společností Pramet Tools, s.r.o., která se především zabývá výrobou řezných nástrojů. V bakalářské práci jsou porovnávány tři modulární hlavičky od společnosti Pramet Tools, s.r.o., výrobce 2 a výrobce 3. Nástroje jsou při zkouškách postupně osazeny dvěma břitovými destičkami geometrií -F a geometrií -M. Cílem je zjistit potřebnou celkovou sílu k odebírání třísek při frézování, příkon stroje a následné vyhodnocení řezných sil VBD.

1 Obecná charakteristika kopírovacího frézování

1.1 Kopírovací frézování

Kopírovací frézování má velké využití při výrobě nepravidelných nebo komplikovaných tvarů (obr. 1.1). Princip spočívá v synchronizaci dráhy frézy s kopírovací dráhou obrobku a s tvarem vyráběného modelu nebo vzorového kusu. Ke kopírování se používá řada zařízení, jako je kladka se sledovacím mechanismem, pantografický mechanismus (k reprodukci menších, větších a stejných součástí, než je šablona) a kopírovací systémy s citlivými snímači s malým kontaktním tlakem mezi čidlem snímače a šablonou nebo modelem. [1]



Obr. 1.1 Příklad kopírovacího frézování složitých tvarů

Vhodné nástroje pro kopírování tvarů mají pro obrábění a pro konstrukci nástrojů velký význam. Při vynechání speciálních nástrojů pro frézování drážek a dutin, se kterými lze obrábět celou řadu tvarů, jsou tu stopkové frézy s čelními půlkruhovými břity a stopkové frézy s kruhovými vyměnitelnými břitovými destičkami. Tyto frézy mají schopnost nejen frézovat, ale lze s nimi vrtat a obrábět složité oblé tvary při vysoké účinnosti obrábění, kde jsou kladeny vysoké nároky na frézovací nástroje. [4]

Kvůli stálému kontaktu frézy s materiálem při obrábění konkávních a konvexních tvarů musí být nástroj na čelní straně stroje opatřen oblým břitem. Toto opatření zajišťuje efektivní obrábění ve všech směrech. [4]

Při každém nájezdu a výjezdu se způsobuje průhyb nástroje, což zapříčiní zanechání výškové stopy na obrobeném povrchu. Tím se snižují jak řezné síly, tak i průhyb nástroje. V okamžiku přiblížení se frézy ke stěně vznikne kontakt na velké styčné délce, což způsobí nárůst rizika průhybu nástroje, vibrací a poškození nástroje. Pro příznivější průběh obrábění je vhodné použití vzestupného kopírování podél strmých stěn, protože tloušťka třísky dosahuje maxima za vlídných řezných rychlostí. [10]



Obr. 1.2 Vzestupné kopírování [10]

1.2 Nástroje pro kopírovací frézování

1.2.1 Modulární hlavičky

Modulární hlavičky jsou z hlediska konstrukce upnuty do upínače pomocí závitů o různých velikostech. Tento způsob upnutí zajišťuje vysokou kvalitu s minimálním vedlejším chvěním a je možné ovlivnit délku upínače pro frézování hlubších ploch. Středem nástrojů je veden otvor pro chladicí kapalinu. U každého typu frézy lze použít jen daný typ VBD, které se do lůžka upínají pomocí šroubků.



Obr. 1.3 Modulární hlavičky

1.2.2 Kruhové VBD

Vysokou stabilitu řezného procesu docílíme použitím kruhových VBD, a to při obrábění (soustružení, frézování) téměř všech druhů materiálů. Užití těchto VBD je vhodné pro obrábění materiálů s vysokou pevností, žáruvzdorných slitin, slitin titanu, korozivzdorné oceli atd. Pro hrubování při velkém posuvu na zub jsou frézy osazené VBD kruhového tvaru schopné s kombinací řeznou rychlostí dosáhnout vysoké kvality obrobené plochy.

Na průběh frézování má velký vliv úhel nastavení hlavního ostří. Jeho velikost ovlivňuje to, jaké jsou řezné síly, jak je rozloženo zatížení břitu a jakým způsobem VBD vniká do obrobku. Úhel hlavního ostří VBD kruhového tvaru je proměnný, a to se zvolenou hloubkou řezu k průměru vyměnitelné břitové destičky. Hloubka řezu značně ovlivňuje tloušťku třísky, kterou je důležité sledovat pro zjištění správného posuvu na zub a výkonu obrábění.

U frézování tvrdších materiálů s VBD kruhové geometrie je vhodné využívat sousledné frézování, čímž se značnou mírou omezí tření hřbetu o obrobenou plochu. Dále se použijí vyšší řezné rychlosti a vyšší hodnoty posuvu na zub, které sníží množství tepla přecházejícího do obrobku a zároveň se zvýší objem tepla odváděného třískami. [4]

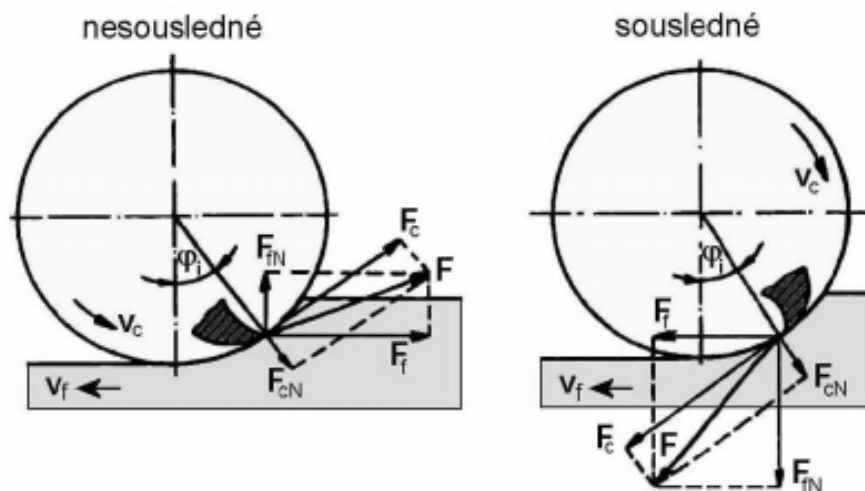


Obr. 1.4 Modulární hlavička osazená kruhovými VBD

1.3 Řezné síly při frézování

I přesto, že jsou v dnešní době řezné nástroje výkonnější než dříve, musí se při obrábění kovů vynaložit značně velké síly na oddělení třísky od obrobku. Postupem času v oblasti řezných sil dochází k vyváženému řezání, především na pozitivní průběh obrábění a stabilitu břitu. Řezné síly se dají teoreticky vypočítat nebo změřit dynamometrem. Tyto síly se skládají ze sil, které vznikají při odřezávání třísky a sil přetvářející třísku. [4]

K určení frézovací síly se vychází ze silového poměru na jednom břitu pod úhlem φ a celkové síly F , která se rozkládá na složky F_c a F_{cN} , neboli na složky F_f a F_{fN} . [3]



Obr. 1.5 Schéma rozložení složek síly řezání při frézování
 F – celková síla řezání, F_c – řezná síla, F_{cN} – kolmá řezná síla řezání, F_f – posuvová síla řezání, F_{fN} – kolmá posuvová síla řezání. [19]

Na řeznou složku síly F_c má vliv měrná řezná síla a k_c a průřez třísky A_D :

$$F_c = k_c \cdot A_D = k_c \cdot a_p \cdot f_z \cdot \sin \varphi \text{ [N]} \quad (1.1)$$

Měrnou sílu řezání k_c lze vyjádřit ze vztahu:

$$k_c = \frac{C_{Fc}}{h_i^{1-x}} = \frac{C_{Fc}}{(f_z \cdot \sin \varphi)^{1-x}} \text{ [MPa]} \quad (1.2)$$

1.4 Měření řezných sil

1.4.1 Přímé měření sil a momentů

K měření řezných sil a momentů jsou používány dynamometry, které slouží k měření deformací v soustavě stroj – nástroj – obrobek během obrábění. Dynamometr zajišťuje nezávislost měřené veličiny na provozních vlastnostech přístroje. U měřicích přístrojů je nezbytné, aby sledovanou veličinu ve zvoleném rozsahu měřily s maximální přesností, dále zaručily stálost naměřených hodnot s časem včetně její opakovatelnosti. Na dynamometry jsou kladeny základní charakteristiky: [5]

- dostatečná tuhost dynamometrů, která je dána velikostí zatěžující síly F ,
- citlivost dynamometrů, aby nejmenší odečítaná jednotka odpovídala celkové hodnotě měřené veličiny,
- stálost údajů po celou dobu měření v závislosti na tuhosti, citlivosti a přesnosti,
- reprodukovatelnost údajů související s předchozími charakteristikami,

- setrvačnost dynamometrů sleduje skutečné hodnoty maximálních a minimálních hodnot měřené řezné síly, zároveň i její časový průběh tak, aby setrvačnost byla co možná nejmenší,
- konstrukce dynamometrů neovlivňuje složky řezných sil.

Zařízení k měření složek řezných sil se nejčastěji skládá ze tří částí: [5]

- pružný člen – převezme vnější zatížení a překonává změny (deformaci, změnu polohy apod.),
- snímač – zajišťuje změnu mechanické veličiny pružného členu na hodnotu analogického parametru měřicí aparatury,
- přijímač – zvyšuje a zpracovává signál snímače.

Základní rozdělení dynamometrů: [5]

- podle počtu měřených složek síly řezání se dynamometry dělí na jednosložkové, dvousložkové, třísložkové a pro měření krouticích momentů,
- podle způsobu přenosu působení síly z deformačního členu na indikační. V tomto případě se jedná o dynamometry mechanické, elektrické, pneumatické, hydraulické, optické a podobně,
- podle metody obrábění, která zahrnuje soustružení, vrtání, frézování a broušení.

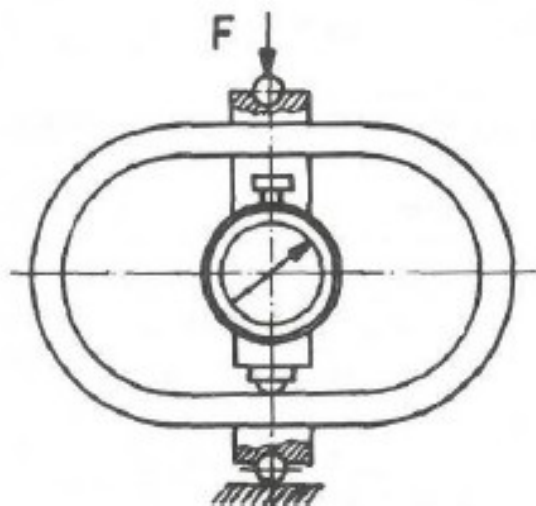
Mechanické dynamometry přenáší působení síly přímo nebo zvětšeně mechanickým převodem na měřicí prvek, který představuje úchylkoměr. Z deformace silových pružin, třmenů, kroužků, nosníků, membrán a podle hloubky vtisku kuličky do materiálu se určuje velikost síly. [5]

Výhody:

- stroje jsou jednoduché, spolehlivé a vyznačují se velkou přesností 0,5 - 2%.

Nevýhody:

- závislost údajů na teplotě, obtížná změna rozsahu měření a nutnost vymezení vlivů mechanismu. [5]



Obr. 1.6 Mechanický dynamometr prstencový [5]

Hydraulické dynamometry způsobují změnu tlaku v kapalině, které přenáší účinek měřených sil nebo momentů na píst nebo membránu hydraulického obvodu. Změny se snímají manometry nebo jiným přístrojem. [5]

Výhody:

- jednoduchost konstrukce, současné měření více složek.

Nevýhody:

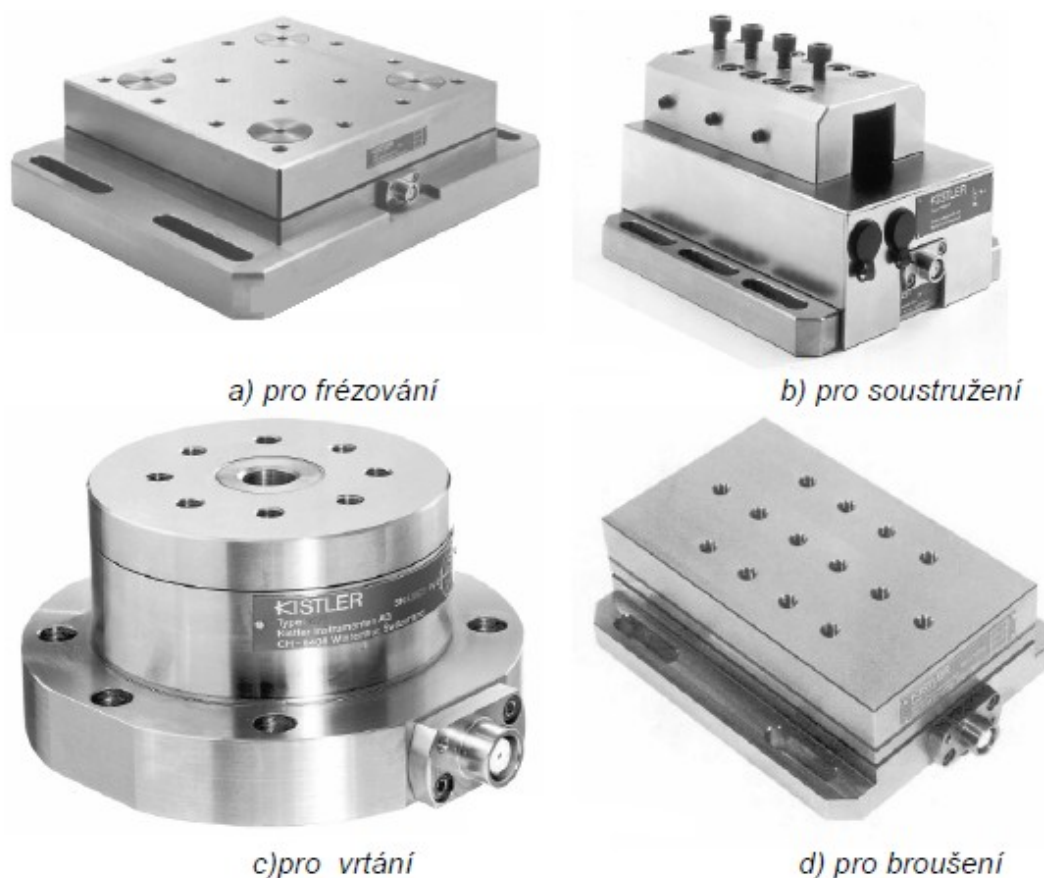
- nízká citlivost, požadavek na dokonalé utěsnění systému a velká setrvačnost. [5]

U **pneumatických** dynamometrů je deformace založena na pneumatickém snímacím systému klapka – tryska, který využívá dynamických vlastností vzduchu procházejícího štěrbinou. U těchto přístrojů je jednoduchá obsluha, údržba, vysoká spolehlivost a relativně nízké náklady na pořízení a provoz. [5]

Mezi nejrozšířenější a nejvíce používané patří dynamometry **elektrické**. U těchto nástrojů je výhodou přenos dálkového signálu s rozšířenou řadou možných úprav. Dále umožňují snímat signál u rotujících a pohybujících se součástí. V provozu je tak čisto a snadná dostupnost napájecích zdrojů. Podle způsobu mechanicko-elektrické transformace jsou rozlišovány dva základní systémy elektrických dynamometrů: [5]

- systémy parametrické, které jsou založeny na změně buď indukčnosti L , nebo kapacitě C anebo na odporu R ,
- systémy generátorové, které jsou založeny na vzniku napětí nebo proudu při deformaci elementů.

Pro snímání deformace **piezoelektrických** dynamometrů se využívá piezoelektrický jev, který při mechanickém zatížení charakterizuje vznik elektrického náboje na povrchu některých krystalků. Mezi nejpoužívanější piezoelektrické materiály patří převážně křemík, Seignettovy soli atd. Základem snímače je měřicí destička vhodně vyříznuta z příslušného krystalu. Velikost náboje je při zatížení přímo úměrná velikosti působící síly a s klesajícím zatížením se lineárně snižuje. Poté, co zatížení klesne na nulu, velikost náboje zcela vymizí. [5]



Obr. 1.7 Dynamometry KISTLER pro měření složek řezné síly [5]

V dnešní době mezi nejmodernější zařízení k měření složek řezných sil patří dynamometry KISTLER, které jsou speciálně konstruované pro potřeby obrábění (obr. 1.7). [5]

1.4.2 Nepřímé měření sil a momentů

Ke zjištění řezných sil nepřímou metodou se převážně vychází z výkonu elektromotoru obráběcího stroje.

$$P_{už} = F_c \cdot v_c \text{ [W]} \quad (1.3)$$

Ze vztahu plyne, že nepřímým měřením řezných sil a momentů lze z výkonu stanovit jen tangenciální složku síly řezání. Tuto složku lze také stanovit nepřímým měřením z točivého momentu. [5]

Dalším způsobem, jak stanovit tangenciální složku řezné síly, je použití užitečného výkonu, který je potřebný pro vlastní řezání. Nejprve se změří celkový výkon stroje při obrábění a poté výkon stroje v nezatíženém stavu. [4]

$$P_{už} = P_c - P_o \text{ [W]} \quad (1.4)$$

Z rovnice (1.3) se stanoví tangenciální složka řezné síly:

$$F_c = \frac{P_{už}}{v_c} \text{ [N]} \quad (1.5)$$

Výhodou tohoto způsobu zjištění řezné síly je jednoduchost, není potřeba měřicí zařízení a lze ji využít u všech metod obrábění. Avšak nevýhodou je velká nepřesnost kvůli rozdílné účinnosti stroje při zatížení a za chodu na prázdko. [4]

1.5 Rozdělení obráběných materiálů

Jedním z nejdůležitějších faktorů při volbě nástroje a počátečních řezných podmínek je zjištění vlastností obráběného materiálu. Podle normy ISO 513 jsou nástrojové materiály rozděleny do 6 skupin, které se dále dělí na další podskupiny. Jednotlivé skupiny mají své identifikační označení písmenem a barvou. [6, 7]

Tab. 1.1 Rozdělení obráběných materiálů [6]

Skupina	Podskupina	Definice podskupiny
P	P1	Oceli a ocelolitiny s velmi dobrou obrobitelností, nízkouhlíkové oceli
	P2	Nelegované a nízkolegované ocelolitiny, oceli se středním obsahem uhlíku ($0,25 < C < 0,55$)
	P3	Hůře obrobitelné nelegované a nízkolegované ocelolitiny, oceli se středním obsahem uhlíku
	P4	Středně až vysoce legované ocelolitiny, oceli s obsahem uhlíku ($C > 0,55$)
M	M1	Feritické korozivzdorné oceli
	M2	Martenzitické korozivzdorné oceli
	M3	Austenitické korozivzdorné oceli
	M4	Feriticko - austenitické oceli
K	K1	Šedé litiny
	K2	Temperované litiny
	K3	Tvárné litiny feritické a feriticko - perlitické
	K4	Tvárné litiny perliticko - feritické, perlitické
N	N1	Hliník a jeho měkké slitiny Al
	N2	Tvrdé slitiny Al
	N3	Měkké slitiny Cu
	N4	Hůře obrobitelné a měkké slitiny Cu
S	S1	Technický čistý Ti
	S2	Slitiny na bázi Fe
	S3	Slitiny na bázi Ni
	S4	Slitiny na bázi Co
H	H1	Vysoce pevné a tvrdé nástrojové oceli, kalené a zušlechtělé oceli (tvrdość 40 - 50 HRC)
	H2	Tvrzená a bílá litina
	H3	Kalené a zušlechtělé oceli (tvrdość 50 - 55 HRC)
	H4	Kalené a zušlechtělé (převážně nástrojové) oceli (tvrdość > 55 HRC)

1.6 Metody povlakování

Výroba povlakovaných slinutých karbidů (SK) probíhá tak, že na podklad běžného SK typu K, P nebo M se nanáší tenká vrstva materiálu, která má vysokou tvrdost a velkou odolnost proti opotřebení. Povlakovaný materiál ve srovnání se substrátem neobsahuje žádné pojivo, má o jeden, ale i o více řádů jemnější zrnitost a méně strukturních defektů. Mimo jiné tvoří i bariéru proti difúznímu opotřebení nástroje. Vlastnosti povrchové vrstvy se s velkou mírou podílejí na zamezení tvorby nárůstků na břitu nástroje. [12]

1.6.1 Metoda PVD

Tato metoda je charakteristická nízkou pracovní teplotou pod 500 °C a ve většině případů je nanášena v jedné vrstvě o tloušťce 3 až 5 µm. Nízká teplota zaručuje, že nedojde k tepelnému ovlivnění nástroje, proto byla původně vyvinuta pro povlakování nástrojů z rychlořezných ocelí. V současnosti však dochází k rozvoji metody PVD a k rozšíření její aplikace pro SK. Povlaky jsou nejčastěji nanášeny: [12, 21]

- **napařováním** - přímé, reaktivní, aktivované reaktivní, s asistencí iontového paprsku,
- **naprašováním** - doutnavý výboj (stejnosměrná nebo RF dioda, trioda, magnetron), iontový paprsek (jediný, dvojitý),
- **iontovou implantací** - doutnavý výboj (stejnosměrná nebo RF dioda, trioda, výboj v duté katodě, naprašováním), iontový paprsek (přímý iontový paprsek, iontový paprsek, skupinový iontový paprsek).

1.6.2 Metoda CVD

Tato metoda probíhá za vysokých teplot ($1\,000 \div 1\,200$ °C) a je nanášena ve více vrstvách o tloušťce 12 až 15 µm. CVD povlaky mají vysokou odolnost proti otěru a skvělou adhezi ke slinutým karbidům. Pro slinuté karbidy je tato metoda nejčastější a může být realizována těmito způsoby: [12, 21]

- tepelně indukovaná,
- plazmaticky indukovaná,
- elektronově indukovaná (paprsek elektronu),
- fotonově indukovaná (např. laserem).

Moderní CVD povlaky jsou kombinací MT-Ti (C, N), Al₂O₃ a TiN. Vlastnosti povlaků z hlediska adheze, houževnatosti a způsobu jejich opotřebení byly průběžně zdokonalovány prostřednictvím optimalizace jejich mikrostruktury a postupů následného zpracování. [21]

1.7 Opotřebení nástroje a jeho trvanlivost

Trvanlivostí nástroje se rozumí čas, během kterého nástroj pracuje až do svého úplného otupení. Z časového průběhu opotřebení vyplývá, že práce s nástrojem v oblasti zrychleného opotřebení přináší nebezpečí poškození nástroje. U každého nástroje, který je dlouho v činnosti, dochází k postupné ztrátě ostroty až do otupení. Okamžik otupení charakterizují určité vnější příznaky. [11, 20]

Příznaky otupení však nemohou být považovány vždy za kritérium otupení, proto je z technologického hlediska rozlišováno poškození nástroje: [11, 20]

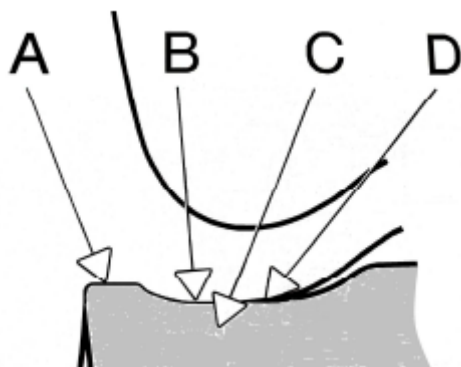
- **postupné** – jde o postupnou změnu jednoho nebo více parametrů, například opotřebení nástroje,
- **náhlé** – jedná se o prudkou změnu jednoho nebo více parametrů, například vylovení břitu.

Na rychlosti opotřebení nástroje závisí čas použitelnosti, který ovlivňuje náklady na nástroje a tím i hospodárnost obrábění. Opotřebení vzniká účinkem tření odebírané třísky a plochy obrobku o nástroj. Mechanismus opotřebení je charakterizován tak, že dochází k otírání drobných částí hraničních vrstev a jejich odstraňování ve formě produktů opotřebení ze zóny řezání. [11]

Volba správného řezného nástroje vede k vysoké produktivitě, která je jedním z nejdůležitějších činitelů při obrábění. Výběr materiálu a vhodné geometrie břitu má zásadní vliv na životnost nástroje. Avšak i při zvolení správného nástroje se může stát, že kvůli nežádoucím vibracím během obrábění, které může zapříčinit špatně upnutí obrobku, nemusí být dosaženo uspokojivé doby trvanlivosti. [4]

Opotřebení břitu patří mezi nevyhnutelný jev. Nepatří však bezpodmínečně mezi negativní. Jestliže dosáhl břit za přijatelnou dobu značného výkonu, jde o pozitivní část procesu. Negativní obrat nastává tehdy, když dojde k poklesu výkonu nebo k lomu nástroje. [4]

Opotřebení nástroje je produktem kombinace zatěžujících faktorů, které působí na břit a mají snahu změnit geometrii břitu. Mezi nejdůležitější faktory opotřebení patří mechanické, tepelné, chemické a abrazivní opotřebení, obr. 1.8: [4]



Obr. 1.8 Typické zóny opotřebení, A – mechanické, B – tepelné, C – chemické, D – abrazivní, [4]

Působením zatěžujících faktorů, které mohou být na břitu pozorovány během obrábění, vznikají základní mechanismy opotřebení: [4]

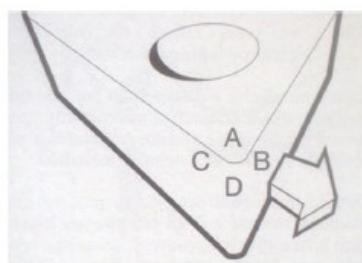
- **abrazivní opotřebení** – nejrozšířenější forma opotřebení, zodpovědná až za 80% veškerého opotřebení. Vznik abrazivního opotřebení způsobují tvrdé částice v materiálu obrobku. Vlivem mechanického zatížení vzniká na hřbetě břitu rovinná plocha. Z větší části k odolávání opotřebení břitu je vysoká tvrdost,
- **oxidační opotřebení** – vzniká za vysokých teplot a přítomnosti okolního vzduchu. U většiny kovů však takové oxidy působí rozdílně. Například wolfram a kobalt tvoří porézní filmy oxidů, které se nechají snadno odnášet třískou, ale oxidy oxidu hlinitého jsou podstatně pevnější a tvrdší. K tomuto vzniku opotřebení jsou některé nástrojové materiály více náchylnější než jiné,
- **difúzní opotřebení** – vzniká na nástroji působením chemických vlivů a rozhoduje o něm chemické složení řezného nástroje a materiálu obrobku. U tohoto procesu má tvrdost materiálu minimální vliv. Některé řezné nástroje nemusí s materiálem obrobku reagovat vůbec, zatímco jiné materiály obrobku mají k řeznému nástroji vysoký stupeň afinity,
- **lom** – vznik lomu může nejvíce zapříčinit kolísání teploty a zatížení řeznými silami. Ovlivňujícím faktorem vzniku lomu je příliš velká tvrdost a pevnost obrobku a vysoký posuv, ale to stejné platí i pro příliš tvrdý nástrojový materiál. Na druhou stranu k lomu může dojít i u příliš měkkého řezného materiálu,
- **adhezní opotřebení** – tento druh opotřebení se vyskytuje na čele břitu nástroje za nízkých teplot obrábění. Vzniká jak u ocelí, které tvoří dlouhou třísku, tak i u ocelí s krátkou třískou. Dochází k vytvoření nárůstků mezi třískou a hřbetem nástroje. Narůstající vrstvy, které jsou z třísky navařovány a stávají se součástí břitu, vytváří základ pro nové nárůstky a mohou poškodit původní břit

vydrolováním nebo vylomením. Pro zmenšení předpokladu vzniku nárůstků se teplota řezu zvyšuje.

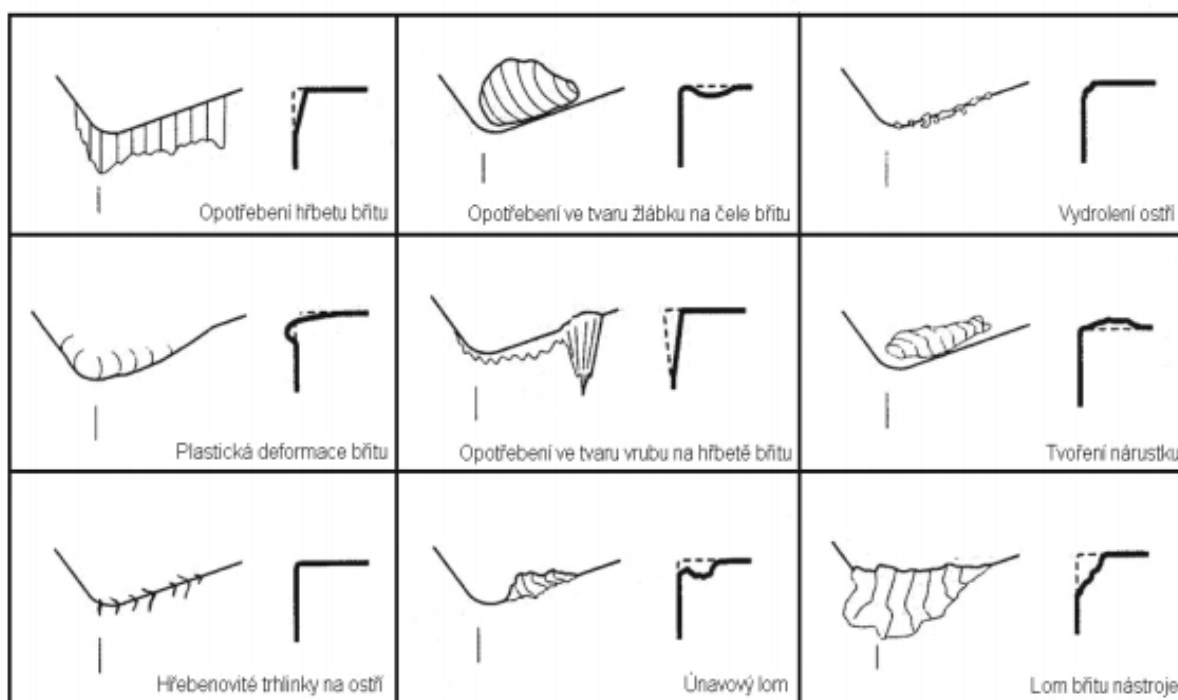
Kombinace popsaných mechanismů opotřebení působí negativně na řezný nástrojový materiál a poškozuje břit v místě řezání. Opotřebení břitu je ovlivňováno v závislosti na vlastnostech řezného materiálu. K zamezení těchto opotřebení se používají správné nástroje a vhodné řezné podmínky. [4]

Pro určení chování nástrojů při obrábění jsou velmi důležité tyto vlastnosti: **tvrdost, houževnatost, tepelná roztažnost, chemická stabilita, tepelná vodivost, stav povrchu, přilnavost povlaku.** [4]

Hlavní oblasti, kde vznikají opotřebení: čelo (A), hlavní hřbet (B), vedlejší hřbet (C), poloměr špičky (D). [4]



Obr. 1.9 Oblast opotřebení na VBD [4]



Obr. 1.10 Klasifikace typů opotřebení břitů nástrojů [4]

2 Geometrie nástrojů a jejich konstrukce

2.1 Geometrie obráběcích nástrojů

Geometrie řezného nástroje má velký vliv na velikost síly řezání a její rozložení do jednotlivých složek, na odvod a utváření třísky, přesnost, drsnost, kvalitu výsledné obrobené plochy, trvanlivost bříty a hospodárnost obráběcího procesu. Pro minimalizování ztrát je při konstrukci a zejména jeho ostření nezbytná dokonalá znalost vhodné pracovní geometrie bříty a jejího vlivu na proces obrábění. [2]

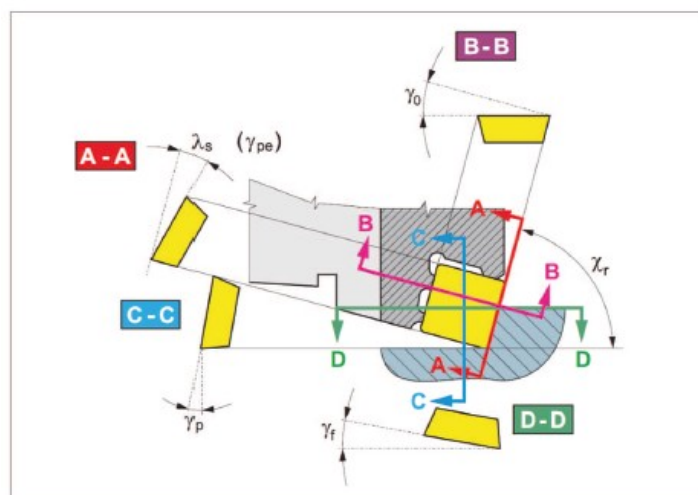
Geometrické i nástrojové parametry jsou charakterizovány pomocí úhlů, které leží v určitých rovinách. Pro jednoznačné zjištění úhlu řezné části se definují dvě souřadnicové soustavy: [2]

- **nástrojová** – uplatňuje se zejména při konstrukci, výrobě, kontrole a ostření nástroje. Roviny používané v této rovině se nazývají nástrojové roviny. Geometrie řezné části v této rovině definována ve statickém pojetí,
- **pracovní** – tato soustava je také nazývána jako **efektivní** nebo **kinetická**. Geometrie se zde zjišťuje během procesu řezání a roviny, které se zde používají. Je nazývána pracovní rovinou.

2.2 Úhly nástroje při frézování

VBD jsou upnuty v tělese frézy a jejich poloha je dána velkým počtem úhlů. **Nástrojový úhel nastavení hlavního ostří (κ_r)** – u tohoto ostří se hodnoty nejčastěji pohybují v rozsahu $45^\circ - 90^\circ$. Leží mezi obráběnou plochou obrobku a hlavním ostřím. Ovlivňuje především tvar třísky a tuhost špičky nástroje má vliv na drsnost obrobeného povrchu součásti. Další úhly, které určují polohu VBD, jsou funkční úhly: [2, 4]

- **úhel sklonu ostří (λ_s)** – ovlivňuje směr odchodu třísky z místa řezu, tuhost špičky nástroje a zpravidla nabývá hodnoty od -6° do $+6^\circ$ (kladný úhel udává směr odchodu třísky od obrobku a naopak),
- **ortogonální úhel čela (γ_o)** – velikost úhlů se běžně volí od -8° do $+8^\circ$ a projevuje se utvářením třísek a opotřebením nástroje. Současně ovlivňuje tuhost i pevnost bříty nástroje.



Obr. 2.1 Břítová destička upnutá ve fréze [4]

Efektivní úhel čela (ortogonální úhel čela) velkou měrou ovlivňuje řezné síly a tím i potřebný příkon stroje. U pozitivního úhlu čela je naopak spotřeba příkonu menší. Množství spotřeby příkonu může být efektivně zmenšeno o 1,5% tím, že se zvětší pozitivní úhel o jeden stupeň. Úhel čela se měří v rovině kolmé k hlavnímu ostří. [4]

U frézování jsou dále rozlišovány konstrukční úhly: [4]

- **axiální úhel (γ_p)** – dle DIN 6581 se jedná o úhel čela nástroje v rovině zadní. Měří se v rovině rovnoběžné s osou rotace nástroje,
- **radiální úhel (γ_f)** – dle DIN 6581 se jedná o úhel čela nástroje v rovině boční. Měří se v rovině kolmé k ose rotace nástroje.

Každý typ frézy vyžaduje různé VBD. Tyto úhly určují typ VBD a ve spojení s daným úhlem nastavení hlavního ostří určují také funkční pracovní úhly. [4]

2.3 Charakteristika VBD

Ve společnosti Pramet Tools, s.r.o. jsou VBD vyráběny ze slinutého karbidu s PVD povlakem. Norma ISO 513 udává tvar a označení VBD. Dále norma podrobně popisuje značení tvarů a velikosti VBD, jejich provedení a geometrii (Obr. 2.2). [7]

1				2		4	
Tvar destičky Tvar doštičky				Úhel hřbetu Uhol chrbta		Provedení Prevedenie	
H	O	P	R	A	B	N	R
S	T	C	D	C	D	F	A
E	M	V	W	E	F	M	G
L	A	B	K	G	N	W	T
				P	O	Q	X
					Speciální Speciálny		Speciální Speciálny

ISO	1	2	3	4
	S	P	G	N
	S	P	K	N

ANSI	1	2	3	4
	S	P	G	
	S	P	K	N

3						
Tolerance Tolerancia						
Označení Označenie	Tolerance / Tolerancia [mm]			Tolerance / Tolerancia [palce]		
	m (±)	s (±)	d = I.C. (±)	m (±)	s (±)	d = I.C. (±)
A	0,005	0,025	0,025	0,0002	0,001	0,0010
F	0,005	0,025	0,013	0,0002	0,001	0,0005
C	0,013	0,025	0,025	0,0005	0,001	0,0010
H	0,013	0,025	0,013	0,0005	0,001	0,0005
E	0,025	0,025	0,025	0,0010	0,001	0,0010
G	0,025	0,130	0,025	0,0010	0,005	0,0010
J	0,005	0,025	0,05 ÷ 0,13	0,0002	0,001	0,002 ÷ 0,005
K	0,013	0,025	0,05 ÷ 0,13	0,0005	0,001	0,002 ÷ 0,005
L	0,025	0,025	0,05 ÷ 0,13	0,0010	0,001	0,002 ÷ 0,005
M	0,08 ÷ 0,18	0,130	0,05 ÷ 0,13	0,003 ÷ 0,007	0,005	0,002 ÷ 0,005
N	0,08 ÷ 0,18	0,025	0,05 ÷ 0,13	0,003 ÷ 0,007	0,001	0,002 ÷ 0,005
U	0,05 ÷ 0,38	0,130	0,05 ÷ 0,13	0,005 ÷ 0,015	0,005	0,003 ÷ 0,010

Obr. 2.2 Značení VBD dle normy ISO 513 [7]

5							
Délka řezné hrany Dĺžka reznjej hrany							
d = I.C.	R	S	T	C	D	V	W
mm	palce						
3,97	5/32"			06			
5,00	-	05					
5,56	7/32"			09			03
6,00	-	06					
6,35	1/4"			11	06	07	04
8,00	-	08					
9,525	3/8"	09	09	16	09	11	16
10,0	-	10					
12,0	-	12					
12,7	1/2"	12	12	22	12	15	08
15,875	5/8"	15	15	27	16		
16,0	-	16					
19,05	3/4"	19	19	33	19		
20,0	-	20					
25,0	-	25					
25,4	1"	25	25		25		
31,75	1 1/4"	31					
32,0	-	32					

6	
Tloušťka Hrúbka	
Označení	s
Označení	[mm] [palce]
01	1,59 1/16"
T1	1,98 5/64"
02	2,38 3/32"
03	3,18 1/8"
T3	3,97 5/32"
04	4,76 3/16"
05	5,56 7/32"
06	6,35 1/4"
07	7,94 5/16"
09	9,52 3/8"

7			
Úhel nastavení Uhol nastavenia	Úhel hřbetu fazetky Uhol chrbta fazetky		
Ozn.	χ_r	Ozn.	α_z
A	45°	A	3°
D	60°	B	5°
E	75°	C	7°
F	85°	D	15°
P	90°	E	20°
Z	Spec./Spec.	F	25°
		G	30°
		N	0°
		P	11°
		Z	Spec./Spec.
ZZ - Speciální/Špeciálny			

5	6	7
12	03	08
12	03	ED

5a	6a	7a
4	2	2
4	2	ED

8	9
S	R

8	9
S	R

ANSI			
5a	6a	7a	
Vepsaná kružnice Vpísaná kružnica	Tloušťka Hrúbka	Rádus špičky Rádus hrotu	
Ozn.	d = I.C.	Ozn.	s
	[mm] [palce]		[mm] [palce]
1	3,175 1/8"	1	1,588 1/16"
(1.2)	3,969 5/32"	(1.2)	1,984 5/64"
(1.5)	4,763 3/16"	(1.5)	2,381 3/32"
(1.8)	5,556 7/32"	(1.8)	3,175 1/8"
2	6,350 1/4"	(2.5)	3,969 5/32"
(2.5)	7,938 5/16"	3	4,763 3/16"
3	9,525 3/8"	4	5,556 7/32"
4	12,700 1/2"	5	6,350 1/4"
5	15,875 5/8"	6	7,938 5/16"
6	19,050 3/4"	7	9,525 3/8"
7	22,225 7/8"	8	11,113 7/16"
8	25,400 1"	9	12,700 1/2"
10	31,750 1 1/4"	10	14,288 9/16"
		12	15,875 5/8"

8	
Provedení řezné hrany / Provedenie reznjej hrany	
	Ostré hrany
	Zaoblené hrany
	Hrany s fazetkou
	Zaoblené hrany s fazetkou
	Hrany s dvojitou fazetkou
	Zaoblené hrany s dvojitou fazetkou

9	
Směr posuvu / Smer posuvu	
R	
L	
N	

Pokračování obr. 2.2 Značení VBD dle normy ISO 513 [7]

3 Popis testovaných nástrojů

V tabulce 3.1 jsou uvedeny technické parametry porovnávaných nástrojů pro kopírovací frézování a porovnávány VBD.

Tab. 3.1 Základní technické parametry nástrojů a VBD

Výrobce	Označení frézy	Geometrie frézy γ_p / γ_f (°)	Označení VBD
Pramet	25E3R032M12-SRC10-C-P01	-7 / -3	RCMT 10T3MOEN-F-P01; M8310 RCMT 10T3MOSN-M-P01; M8310
Výrobce 2	TERY 325-M12-10	-3 / -10	RYMX 1004-ML; TT8080 RYMX 1004-M; TT8080
Výrobce 3	7713VR10SA025Z3R35	+5 / -5	RPMT 10T3MOE-41-X4; SP6519 RPHT 10T3MOT-X4; SP6519

3.1 Nástroj 25E3R032M12-SRC10-C-P01 a testované VBD

Pro testování byla zvolena fréza typu 25E3R032M12-SRC10-C-P01, (obr. 3.1) od výrobce Pramet Tools, s.r.o. Jedná se o modulární hlavičku o průměru $D = 25$ mm.



Obr. 3.1 Fréza typu 25E3R032M12-SRC10-C-P01

Z hlediska konstrukce je tato fréza upnuta do upínače pomocí závitu M12. Tento způsob upnutí zajišťuje vysokou kvalitu s minimálním vedlejším chvěním a je možné ovlivnit délku upínače pro frézování hlubších ploch. VBD o průměru $D = 10$ mm jsou upínány do lůžek pomocí šroubků. Maximální axiální hloubka řezu je $a_p = 5$ mm, společnost Pramet Tools, s.r.o. však doporučuje $a_p = 2,5$ mm. Povrch frézy je upraven chemickým niklováním a středem nástroje je veden otvor pro chladicí kapalinu. Pro daný typ frézy byly pro zkoušení zvoleny VBD kruhového tvaru s označením

RCMT 10T3MOEN-F-P01; M8310, které se používají pro dokončovací práce VBD s označením RCMT 10T3MOSN-M-P01; M8310 pro polohrubování. Destičky jsou vyrobeny z materiálu M8310, které díky jemnozrnnému karbidu wolframu s legujícím obsahem kubických karbidů obsahující tantal, niob a s poměrně vysokým obsahem kobaltu přináší vysokou houževnatost, tvrdost a odolnost vůči opotřebení. VBD jsou chráněny PVD povlakem. [16]

3.2 Nástroj TERY 325-M12-10 a testované VBD

Pro testování od výrobce 2 byla zvolena fréza typu TERY 325-M12-10, (obr. 3.3). Jako u všech testovaných nástrojů, i zde se jedná o modulární hlavičku o průměru $D = 25$ mm.



Obr. 3.3 Fréza typu TERY 325-M12-10

Fréza je z konstrukčního hlediska upnuta pomocí závitu M12, který zajišťuje vysokou kvalitu s minimálním vedlejším chvěním. Pro hlubší frézování je možné hloubku ovlivnit použitím různé délky upínače. Povrch frézy je fyzikálně upravený a středem nástroje je veden otvor pro chladicí kapalinu. Tento typ frézy užívá VBD o průměru $D = 10$ mm o maximální axiální hloubce řezu je $a_p = 5$ mm. Destičky jsou do lůžek upínány pomocí šroubků. Pro zvolený typ frézy byly ke zkoušení zvoleny VBD kruhového tvaru s označením RYMX 1004-ML; TT8080, které se používají pro dokončovací práce, a VBD s označením RYMX 1004-M; TT8080 pro polohrubování. Tyto destičky jsou vyrobeny z materiálu TT8080, který vyniká výbornou houževnatostí a schopností odolávat odlamování. Destičky jsou opatřeny PVD povlakem. [18]

3.3 Nástroj 7713VR10SA025Z3R35 a testované VBD

Od výrobce 3 byla pro testování zvolena fréza typu 7713VR10SA025Z3R35, (obr. 3.2). Rovněž se jedná o modulární hlavičku o průměru $D = 25$ mm.



Obr. 3.2 Fréza typu 7713VR10SA025Z3R35

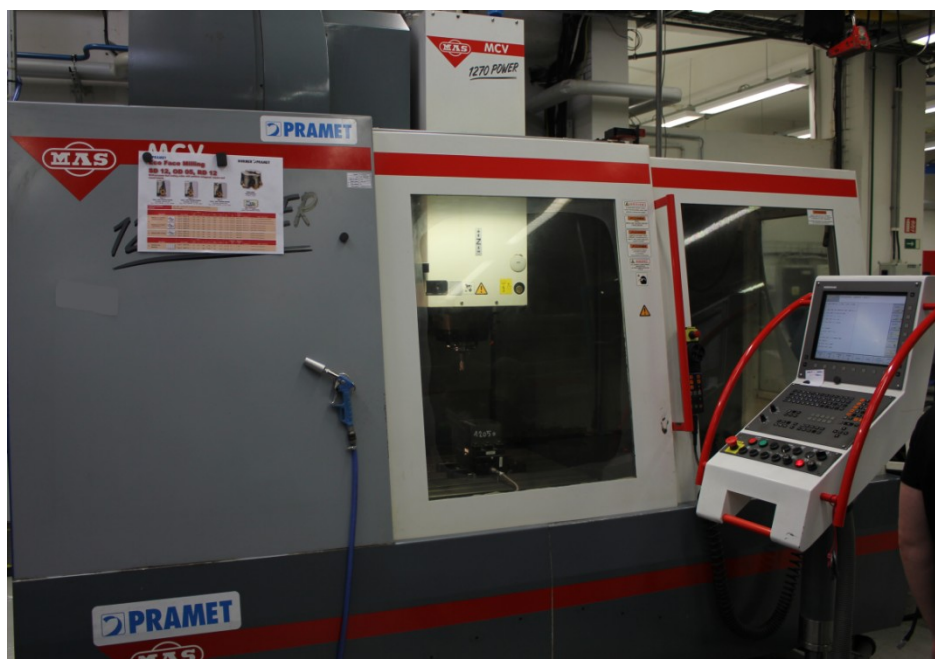
Tato fréza je z hlediska konstrukce opět upínána pomocí závitu M12, který zajišťuje vysokou kvalitu s minimálním vedlejším chvěním. Pro hlubší frézování je možné hloubku ovlivnit použitím různé délky upínače. Povrch frézy je fyzikálně upravený a středem nástroje je veden otvor pro chladicí kapalinu. U tohoto typu frézy se používají VBD o průměru $D = 10$ mm a jsou upínány do lůžek pomocí šroubků. Maximální axiální hloubka řezu je $a_p = 5$ mm. Pro zvolený typ frézy byly pro zkoušení zvoleny VBD kruhového tvaru s označením RPMT 10T3MOE-41-X4; SP6519, které se používají pro dokončovací práce VBD s označením RPHT 10T3MOT-X4; SP6519 pro polohrubování. Tyto destičky jsou vyrobeny z materiálu SP6519 a opatřeny PVD povlakem nové generace TiAlN. Tento povlak je odolný vůči oxidaci a má vysokou tvrdost. [17]

4 Experimentální zkouška

Praktická část bakalářské práce byla prováděna ve zkušebně společnosti Pramet Tools s.r.o. Šumperk. Zkouška byla zaměřena na stanovení řezných sil u fréz pro kopírovací frézování od společnosti Pramet Tools, s.r.o., výrobce 2 a výrobce 3, které budou osazeny jednou VBD. Měření řezných sil bylo rozděleno na dvě části z hlediska použitých geometrií VBD. Pro měření byly použity VBD geometrie –F, které mají zaoblenou řeznou hranu bez fazetky, a geometrie –M se zaoblenou řeznou hranou s fazetkou. Obráběným materiálem byla uhlíková ocel ČSN 12 050.1 (C45), u které byly pomocí dynamometru KISTLER, typ 9265 A, měřeny řezné síly VBD. Obrobek o rozměrech 130x128x100 (mm) byl pro upnutí do držáku přizpůsoben z hlediska použitého dynamometru.

4.1 Strojní vybavení

Testy byly prováděny na frézovacím CNC centrum MCV 1270 Power od výrobce Kovosvit MAS, obr. 4.1. Technické parametry použitého CNC stroje jsou zapsány v tab. 4.1.



Obr. 4.1 Frézovací CNC centrum MCV 1270 Power

Tab. 4.1 Technické parametry CNC stroje MCV 1270 Power [13]

Název	Parametry	Velikost
Stroj - MCV 1270 Power	Délka x šířka x výška	5000 mm x 3600 mm x 3330 mm
	Maximální otáčky vřetene	8000 min ⁻¹
Zásobník nástrojů	Počet míst v zásobníku	24 (40)
Motor	Výkon motoru S1/S6 – 25% (40%)	28 / 43 kW
Stůl	Upínací plocha stolu	1500 mm x 670 mm
	T – drážky (počet x šířka x rozteč)	5 mm x 18 mm x 125 mm
	Maximální zatížení stolu	1200 kg
Pracovní rozsah	Osa X, Y, Z	1270 mm, 610 mm, 720 mm

Zkouška měření řezných sil byla prováděna na uhlíkové oceli 12 050.1. Jedná se o normalizačně žíhanou ocel, která je dobře obrobitelná. Tato ocel je vhodná pro pevnostní díly ve strojírenství a zejména pro tepelně zpracované díly, kde jsou maximálně využity mechanické vlastnosti této oceli. Je vhodná pro typové součásti, jako jsou hřídele těžních strojů, na větší ozubená kola, šneky, ozubené věnce atd. Mechanické a chemické vlastnosti jsou uvedeny v tabulkách 4.2 a 4.3. [15]

Tab. 4.2 Mechanické vlastnosti oceli 12 050.1 [14]

Název	Velikost
Mez pevnosti v tahu R_m (MPa)	640 ÷ 780
Minimální mez kluzu R_e (MPa)	390
Minimální tažnost A_5 (%)	20
Minimální nárazová práce KV (J)	-

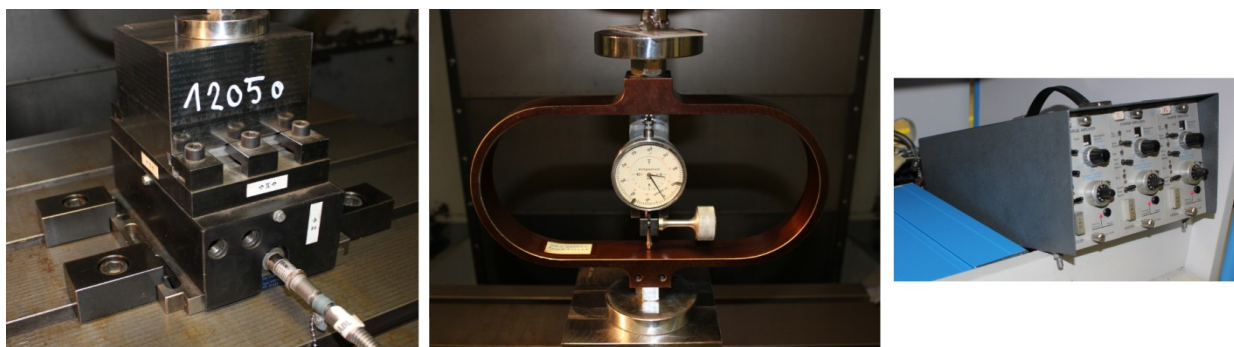
Tab. 4.3 Chemické složení oceli 12 050.1 v hm% [14]

C (%)	Mn (%)	Si (%)	P max (%)	S max (%)	Cr max (%)	Ni max (%)	Cu max (%)	ostatní (%)
0,42 ÷ 0,50	0,50 ÷ 0,80	0,17 ÷ 0,37	0,04	0,04	0,25	0,30	0,30	-

4.2 Příslušenství k experimentální části

K měření řezných sil byla zvolena ocel 12 050.1 o velikosti 130 x 128 x 100 mm, která byla upnuta do třísložkového dynamometru KISTLER, typ 9265 A, obr. 4.2. Ke kalibraci dynamometru byl použit mechanický siloměr, obr. 4.2 a pro vyhodnocení řezných sil byl použit třísložkový nábojový zesilovač, typ 5006, který slouží k zesílení

signálu (náboje) získaného z piezoelektrického snímače obr. 4.2. Pro zamezení nadměrných vibrací nástroje byla citlivost snímače nastavena na 10 000 Hz.

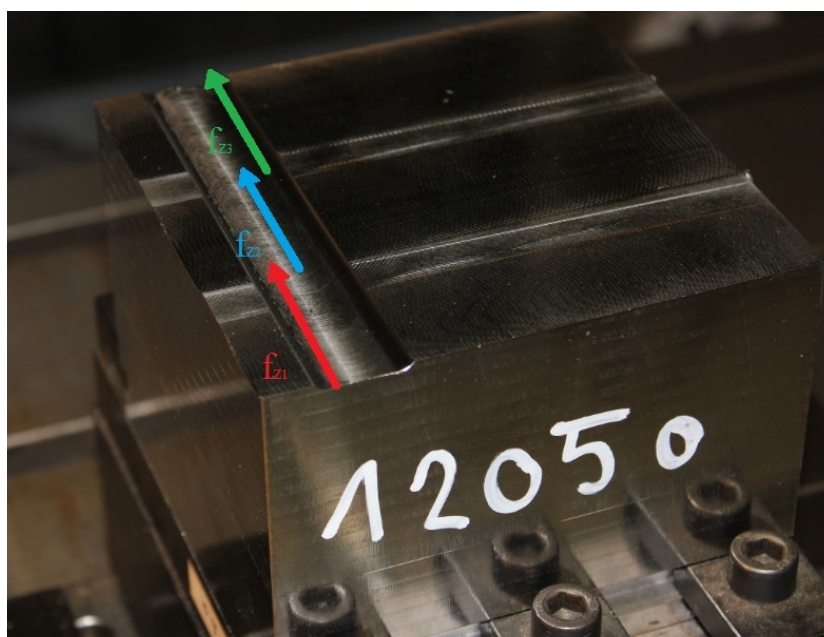


*Obr. 4.2 Příslušenství pro měření řezných sil
(vlevo - dynamometr KISLTER; uprostřed - mechanický siloměr; vpravo - tříslůžkový
nábojový zesilovač typ 5006)*

4.3 Měření řezných sil

Pro měření řezných sil byly použity frézovací nástroje s VBD – modulární hlavičky 25E3R032M12-SRC10-C-P01, TERY 325-M12-10 a 7713VR10SA025Z3R35 o průměru $D = 25$ mm. V tabulkách 4.4 a 4.5 jsou popsány řezné podmínky.

Meření řezných sil bylo prováděno osazením nástroje jednou VBD danou geometrií a posuvy f_{z1} , f_{z2} a f_{z3} (obr. 4.3) z důvodu stanovení řezných sil a tím i potřebné velikosti příkonu stroje na obrábění. Jedná se o měření složek sil F_c (tangenciální složka síly), F_f (posuvová složka síly) a F_p (pasivní složka síly), avšak společnost Pramet Tools, s.r.o. používá následné značení: $F_{t\max} = F_x$ (tangenciální složka síly), $F_{n\max} = F_y$ (normálová složka síly), $F_{z\max} = F_z$ (axiální složka síly). Po naměření řezných sil se následně budou porovnávat jejich výslednice F_v .



Obr. 4.3 Schéma posuvu nástroje f_{z1} , f_{z2} a f_{z3}

Tab. 4.4 Řezné podmínky pro obrábění VBD geometrie -F

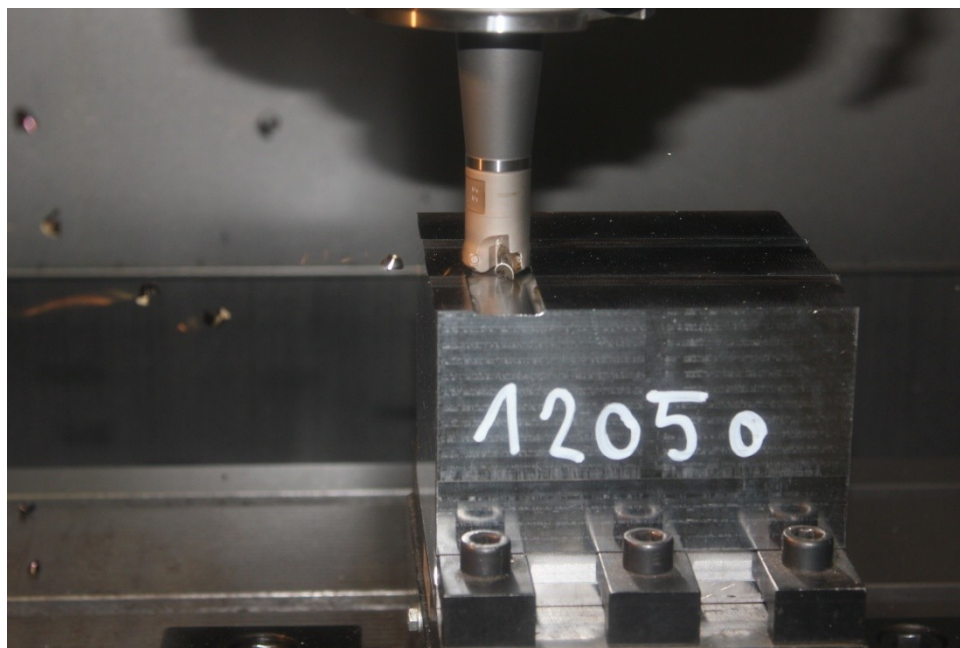
Výrobce VBD	Označení VBD	Posuv na zub f_z (mm)	Posuv f_{\min} (mm · min ⁻¹)
Pramet	RCMT 10T3MOEN-F-P01; M8310	0,1; 0,2; 0,3	295; 591; 886
Výrobce 2	RYMX 1004-ML; TT8080	0,1; 0,2; 0,3	295; 591; 886
Výrobce 3	RPMT 10T3MOE-41-X4; SP6519	0,1; 0,2; 0,3	295; 591; 886
Název		Hodnota	
Hloubka řezu		$a_p = 1,5$ mm	
Otáčky		$n = 2\,953$ (min ⁻¹)	
Řezná rychlost		$v_c = 205$ m · min ⁻¹	
Průměr záběru frézy		$D = 22,1$ mm	



Obr. 4.4 Modulární frézy osazené jednou VBD

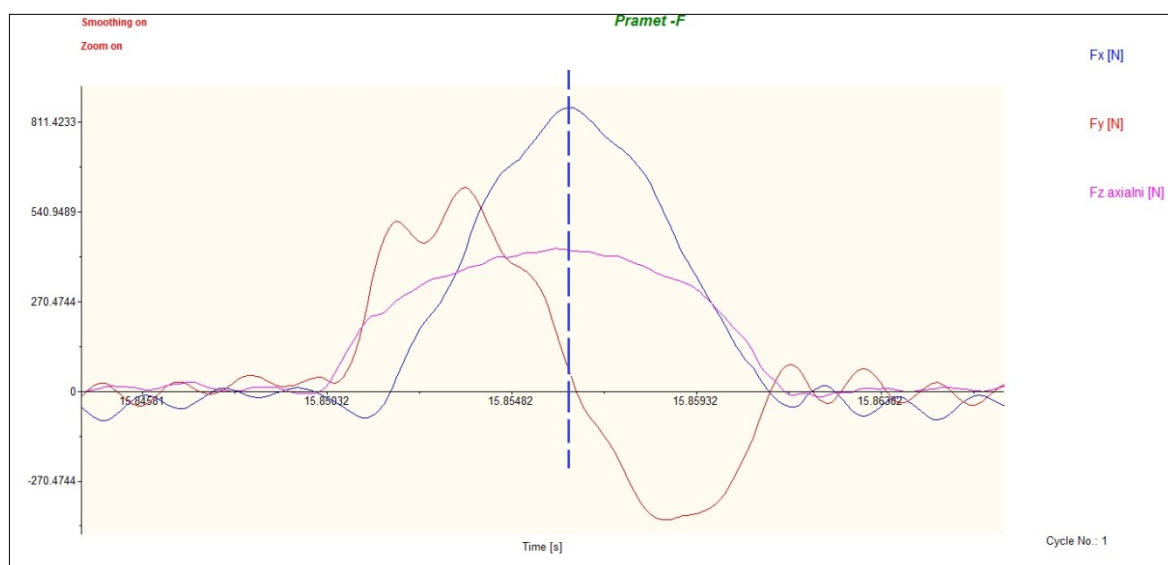
Tab. 4.5 Řezné podmínky pro obrábění VBD geometrie -M

Výrobce VBD	Označení VBD	Posuv na zub f_z (mm)	Posuv f_{\min} (mm · min ⁻¹)
Pramet	RCMT 10T3MOSN-M-P01; M8310	0,15; 0,3; 0,45	443; 886; 1329
Výrobce 2	RYMX 1004-M; TT8080	0,15; 0,3; 0,45	443; 886; 1329
Výrobce 3	RPHT 10T3MOT-X4; SP6519	0,15; 0,3; 0,45	443; 886; 1329
Název		Hodnota	
Hloubka řezu		$a_p = 1,5$ mm	
Otáčky		$n = 2\,953$ (min ⁻¹)	
Řezná rychlost		$v_c = 205$ m · min ⁻¹	
Průměr záběru frézy		$D = 22,1$ mm	

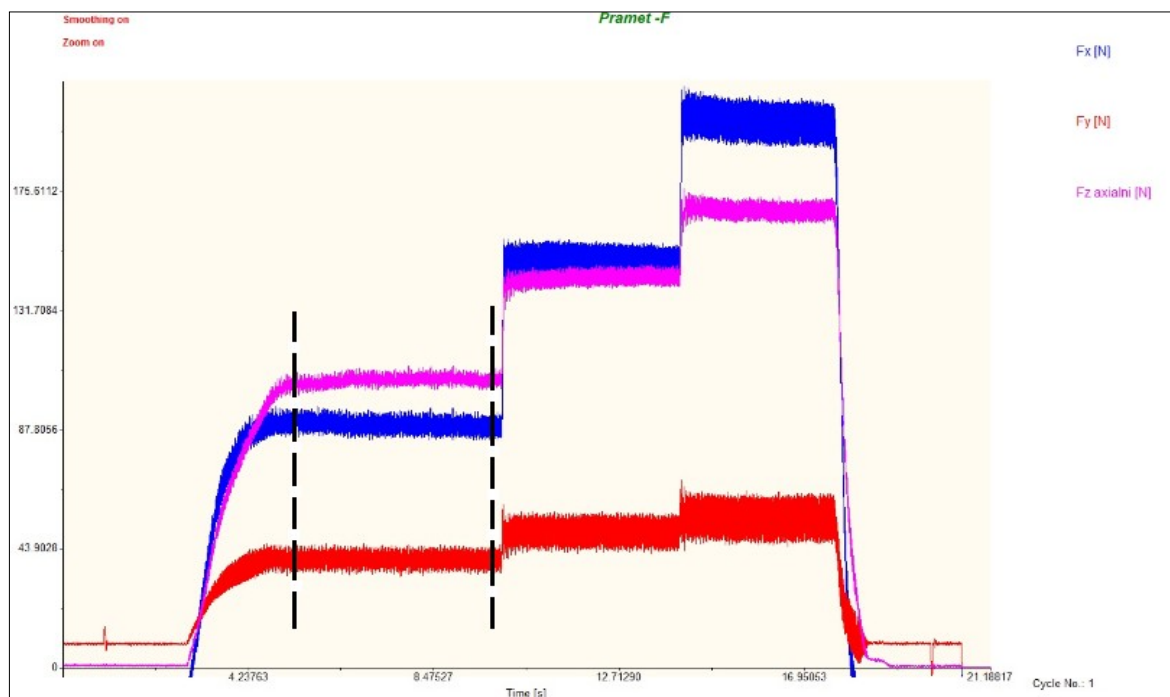


Obr. 4.5 Fréza osazena VBD za chodu

Po naměření hodnot $F_{t\max} = F_x$ (tangenciální složka síly), $F_{n\max} = F_y$ (normálová složka síly), $F_{z\max} = F_z$ (axiální složka síly) pomocí třísložkového zesilovače, typ 5006 (obr. 4.2) byly zjišťovány síly při záběru frézy jednou VBD v okamžiku $F_{t\max} = F_x$, (obr. 4.6) a síly v daném rozsahu měření f_{z1} , f_{z2} a f_{z3} , (obr. 4.7). K určení sil $F_{t\max} = F_x$ a výsledné síly F_v v rozsazích posuvů f_{z1} , f_{z2} a f_{z3} byl použit software 2825A Dynoware.



Obr. 4.6 Maximální naměřená síla jednoho zubu v okamžiku $F_{t\max} = F_x$ – Pramet, geometrie –F



Obr. 4.7 Naměřené složky řezných sil v rozsahu posuvu f_{z1} – Pramet, geometrie -F

5 Vyhodnocení experimentální zkoušky

K měření řezných sil byly v prvním měření použity kruhové VBD geometrie -F, tab. 5.1, které zahrnují destičky RCMT 10T3MOEN-F-P01; M8310, RYMX 1004-ML; TT8080 a RPMT 10T3MOE-41-X4; SP6519. Toto měření bylo prováděno během axiální hloubky řezu $a_p = 1,5$ mm a při posuvu na zub $f_{z1} = 0,1$ mm, $f_{z2} = 0,2$ mm a $f_{z3} = 0,3$ mm, kde byla zjišťována maximální síla při záběru frézy jednou VBD v okamžiku $F_{t \max} = F_x$, (obr. 4.6) a poté složky sil v rozsahu f_{z1} , f_{z2} a f_{z3} , (obr. 4.7). Následně byl vypočítán potřebný příkon stroje v okamžiku maximální síly jednoho zubu.

Při druhém měření byly testovány kruhové VBD geometrie -M. Zde byly použity destičky RCMT 10T3MOSN-M-P01; M8310, RYMX 1004-M; TT8080 a RPHT 10T3MOT-X4; SP6519. Tento průběh měření byl prováděn během axiální hloubky řezu $a_p = 1,5$ mm a při posuvu na zub $f_{z1} = 0,15$ mm, $f_{z2} = 0,3$ mm a $f_{z3} = 0,45$ mm. Průběh zkoušky probíhal obdobně jako u prvního měření.

Pro vyhodnocení zkoušky měření řezných sil se bude vycházet z výsledných sil F_v z okamžiku $F_{t \max} = F_x$ a z rozsahu posuvů f_{z1} , f_{z2} a f_{z3} .

$$F_v = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \text{ [N]} \quad (5.1)$$

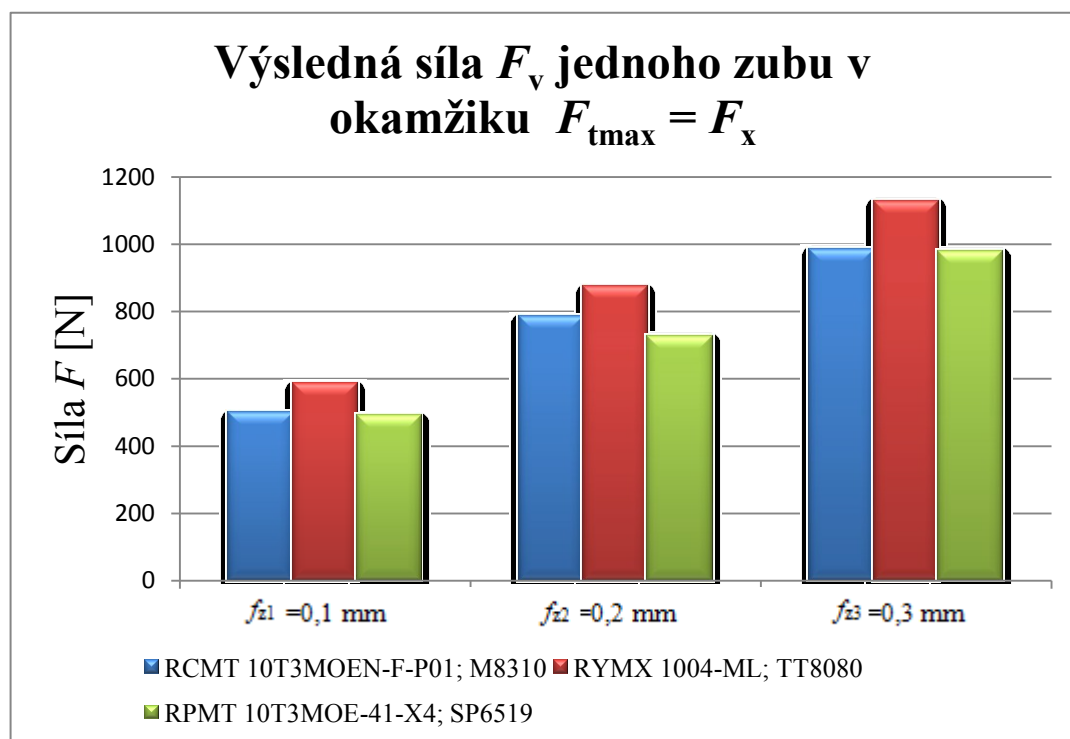
5.1 Měření řezných sil VBD geometrie -F

5.1.1 Maximální naměřená síla jednoho zubu

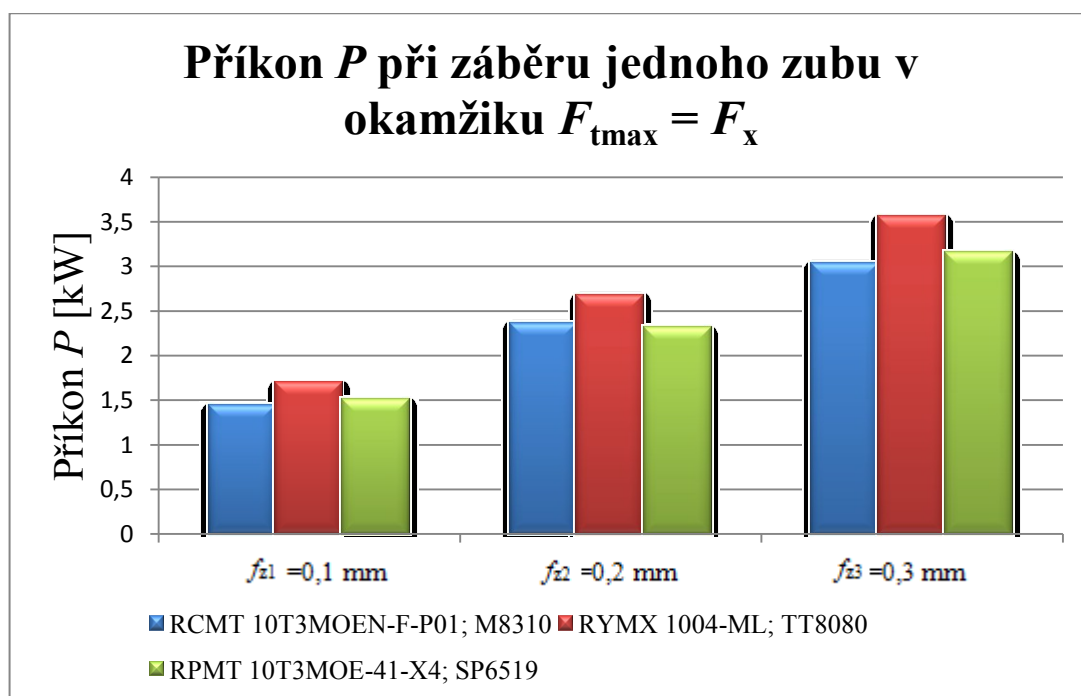
Při tomto měření byla měřena síla, kterou destička dosáhla v okamžiku maximální hodnoty $F_{t \max} = F_x$ u posuvů f_{z1} , f_{z2} a f_{z3} . V tabulce 5.1 jsou pro přehled uvedeny naměřené hodnoty. Z těchto hodnot byl sestaven graf 5.1, kde je znázorněna dosažená výsledná síla F_v u VBD při posuvech f_{z1} , f_{z2} a f_{z3} geometrie -F a graf 5.2, pro znázornění dosaženého maximálního příkonu P u VBD při posuvech f_{z1} , f_{z2} a f_{z3} geometrie -F.

Tab. 5.1 Výsledky řezných sil a příkonů VBD geometrie -F z okamžiku $F_{t \max} = F_x$

RCMT 10T3MOEN-F-P01; M8310			
Parametr	$f_{z1} = 0,1 \text{ mm}$	$f_{z2} = 0,2 \text{ mm}$	$f_{z3} = 0,3 \text{ mm}$
$F_{t \max} = F_x$	421 N	693 N	889 N
$F_{n \max} = F_y$	32 N	62 N	48 N
$F_{z \max} = F_z$	268 N	364 N	423 N
F_v	500 N	785 N	986 N
P	1,44 kW	2,37 kW	3,04 kW
RYMX 1004-ML; TT8080			
Parametr	$f_{z1} = 0,1 \text{ mm}$	$f_{z2} = 0,2 \text{ mm}$	$f_{z3} = 0,3 \text{ mm}$
$F_{t \max} = F_x$	499 N	783 N	1 042 N
$F_{n \max} = F_y$	96 N	110 N	95 N
$F_{z \max} = F_z$	290 N	375 N	424 N
F_v	585 N	875 N	1 129 N
P	1,70 kW	2,68 kW	3,56 kW
RPMT 10T3MOE-41-X4; SP6519			
Parametr	$f_{z1} = 0,1 \text{ mm}$	$f_{z2} = 0,2 \text{ mm}$	$f_{z3} = 0,3 \text{ mm}$
$F_{t \max} = F_x$	442 N	676 N	923 N
$F_{n \max} = F_y$	77 N	73 N	109 N
$F_{z \max} = F_z$	202 N	258 N	311 N
F_v	492 N	727 N	980 N
P	1,51 kW	2,31 kW	3,15 kW



Graf 5.1 Výsledná síla F_v u VBD při posuvech f_{z1} , f_{z2} a f_{z3} - geometrie -F



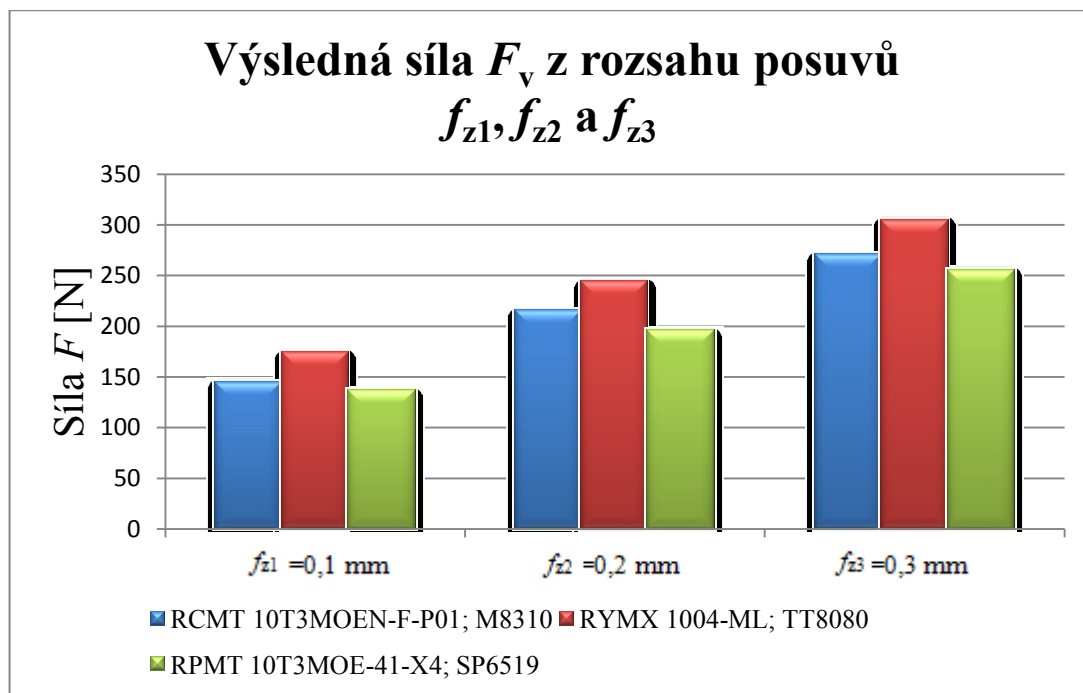
Graf 5.2 Maximální příkon P u VBD při posuvech f_{z1} , f_{z2} a f_{z3} - geometrie -F

5.1.2 Naměřené složky řezných sil v rozsahu posuvů

Během tohoto měření byly měřeny složky řezných sil v rozsahu posuvů f_{z1} , f_{z2} a f_{z3} . Výsledky měření jsou zapsány v tabulce 5.2. Pro grafické znázornění dosažené výsledné síly F_v u VBD při posuvech f_{z1} , f_{z2} a f_{z3} geometrie -F byl sestaven graf 5.3.

Tab. 5.2 Výsledky řezných sil VBD geometrie -F z rozsahu posuvů f_{z1} , f_{z2} a f_{z3}

RCMT 10T3MOEN-F-P01; M8310			
Parametr	$f_{z1} = 0,1 \text{ mm}$	$f_{z2} = 0,2 \text{ mm}$	$f_{z3} = 0,3 \text{ mm}$
$F_{t\max} = F_x$	90 N	152 N	204 N
$F_{n\max} = F_y$	40 N	51 N	56 N
$F_{z\max} = F_z$	106 N	144 N	169 N
F_v	145 N	216 N	271 N
RYMX 1004-ML; TT8080			
Parametr	$f_{z1} = 0,1 \text{ mm}$	$f_{z2} = 0,2 \text{ mm}$	$f_{z3} = 0,3 \text{ mm}$
$F_{t\max} = F_x$	106 N	171 N	231 N
$F_{n\max} = F_y$	54 N	69 N	79 N
$F_{z\max} = F_z$	127 N	160 N	183 N
F_v	174 N	244 N	305 N
RPMT 10T3MOE-41-X4; SP6519			
Parametr	$f_{z1} = 0,1 \text{ mm}$	$f_{z2} = 0,2 \text{ mm}$	$f_{z3} = 0,3 \text{ mm}$
$F_{t\max} = F_x$	92 N	150 N	209 N
$F_{n\max} = F_y$	43 N	54 N	66 N
$F_{z\max} = F_z$	92 N	114 N	132 N
F_v	137 N	196 N	256 N



Graf 5.3 Výsledná síla F_v u VBD při posuvech f_{z1}, f_{z2} a f_{z3} - geometrie -F

Při prvním měření s kruhovou VBD geometrií -F bylo zjištěno, že nejnižších hodnot řezných sil dosáhla destička RPMT 10T3MOE-41-X4; SP6519. Z ekonomického hlediska však byla vyhodnocena nejlépe destička RCMT 10T3MOEN-F-P01; M8310, protože u dvou posuvů dosáhla nejnižšího potřebného příkonu stroje na obrábění.

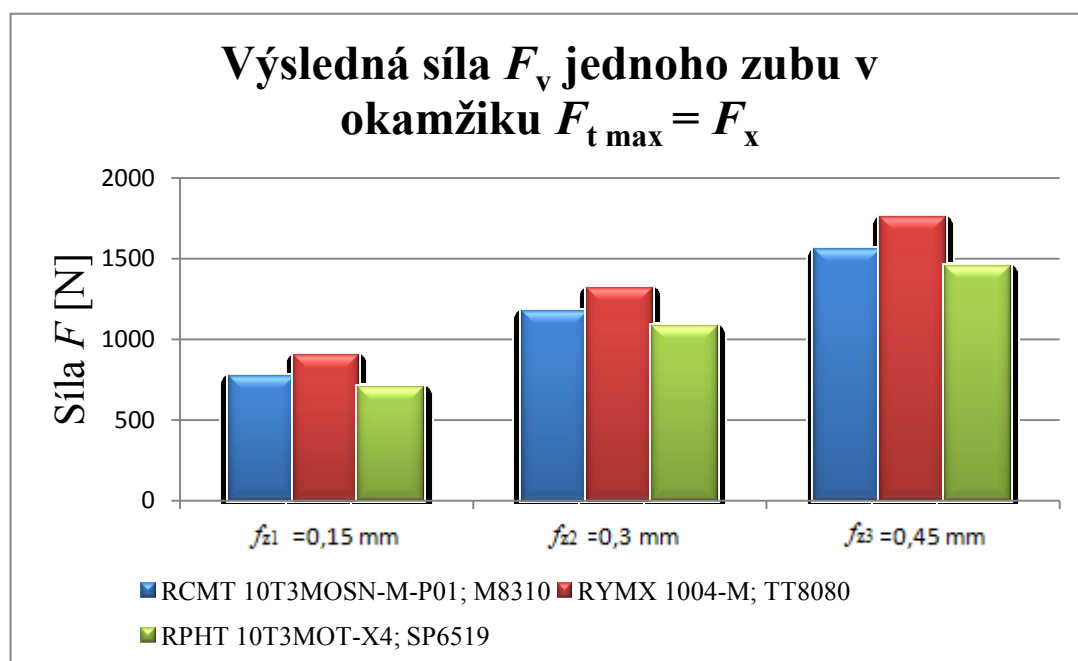
5.2 Měření řezných sil VBD geometrie -M

5.2.1 Maximální naměřená síla jednoho zubu

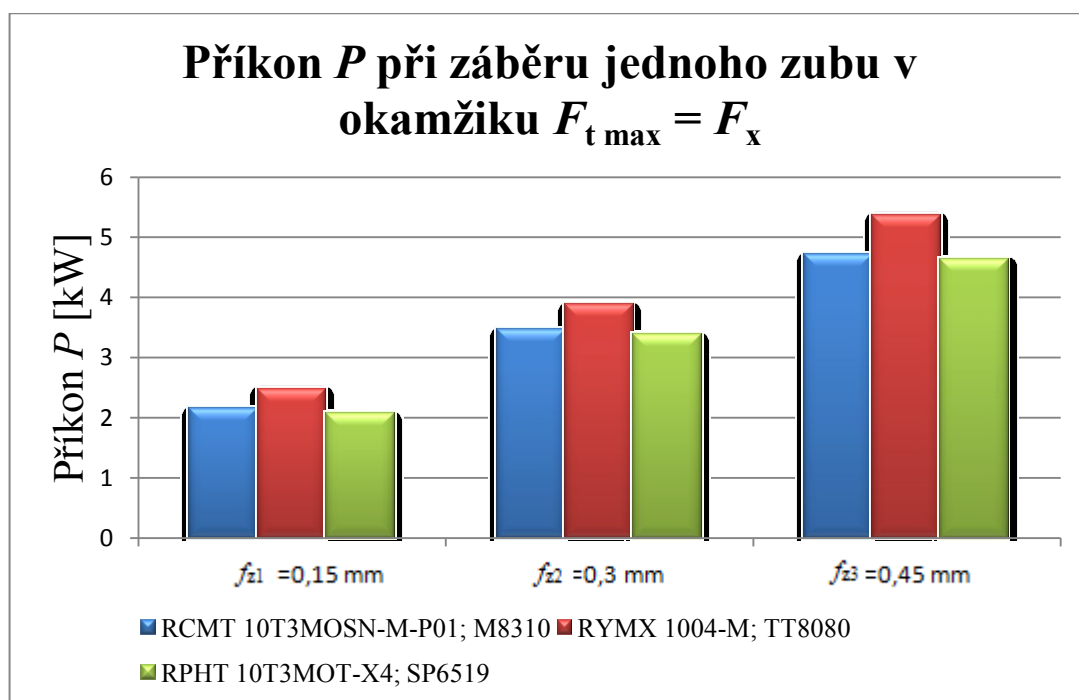
Při tomto měření byla měřena síla, kterou destička opět dosáhne v okamžiku maximální hodnoty $F_{t \max} = F_x$ u posuvů f_{z1}, f_{z2} a f_{z3} . V tabulce 5.3 jsou pro přehled uvedeny naměřené hodnoty. Z těchto hodnot byl sestaven graf 5.4, kde je znázorněna výsledná síla F_v u VBD při posuvech f_{z1}, f_{z2} a f_{z3} geometrie -M a graf 5.5, pro znázornění dosaženého maximálního příkonu P u VBD při posuvech f_{z1}, f_{z2} a f_{z3} geometrie -M.

Tab. 5.3 Výsledky řezných sil a příkonů VBD geometrie -M z okamžiku $F_{t \max} = F_x$

RCMT 10T3MOSN-M-P01; M8310			
Parametr	$f_{z1} = 0,15 \text{ mm}$	$f_{z2} = 0,3 \text{ mm}$	$f_{z3} = 0,45 \text{ mm}$
$F_{t \max} = F_x$	628 N	1 012 N	1 379 N
$F_{n \max} = F_y$	113 N	105 N	56 N
$F_{z \max} = F_z$	430 N	575 N	721 N
F_v	769 N	1 169 N	1 557 N
P	2,15 kW	3,46 kW	4,71 kW
RYMX 1004-M; TT8080			
Parametr	$f_{z1} = 0,15 \text{ mm}$	$f_{z2} = 0,3 \text{ mm}$	$f_{z3} = 0,45 \text{ mm}$
$F_{t \max} = F_x$	727 N	1 137 N	1 572 N
$F_{n \max} = F_y$	190 N	163 N	112 N
$F_{z \max} = F_z$	498 N	637 N	765 N
F_v	901 N	1 313 N	1 752 N
P	2,48 kW	3,88 kW	5,37 kW
RPHT 10T3MOT-X4; SP6519			
Parametr	$f_{z1} = 0,15 \text{ mm}$	$f_{z2} = 0,3 \text{ mm}$	$f_{z3} = 0,45 \text{ mm}$
$F_{t \max} = F_x$	606 N	991 N	1 359 N
$F_{n \max} = F_y$	102 N	103 N	93 N
$F_{z \max} = F_z$	330 N	418 N	498 N
F_v	698 N	1 080 N	1 450 N
P	2,07 kW	3,39 kW	4,64 kW



Graf 5.4 Výsledná síla F_v u VBD při posuvech f_{z1} , f_{z2} a f_{z3} - geometrie -M



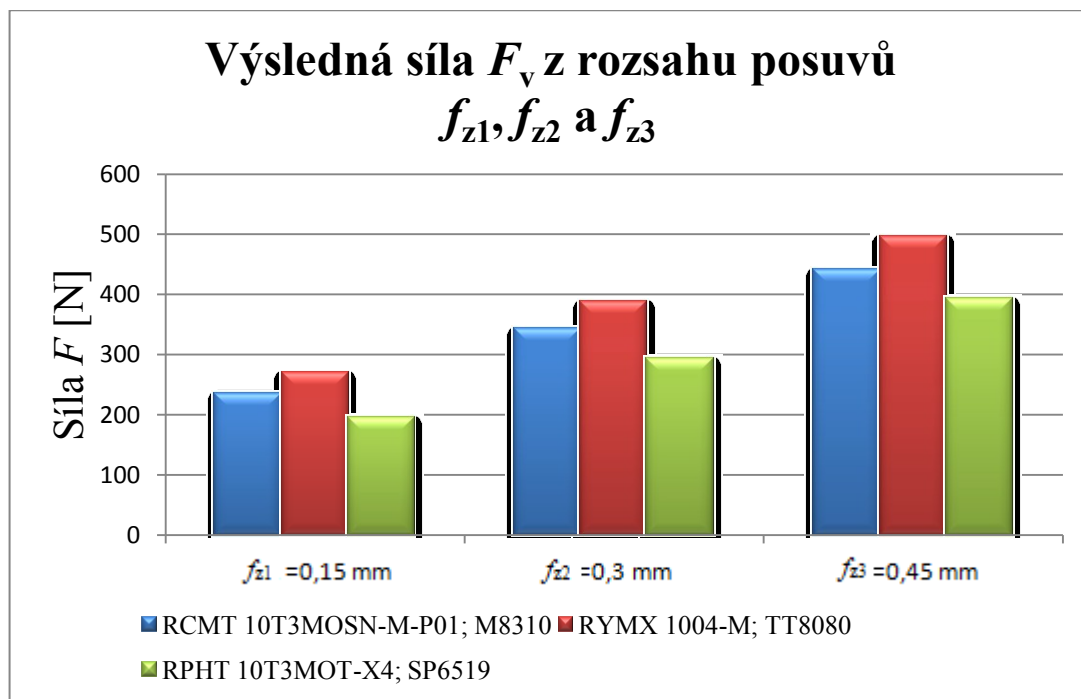
Graf 5.5 Maximální příkon P u VBD při posuvech f_{z1} , f_{z2} a f_{z3} - geometrie -M

5.2.2 Naměřené složky řezných sil v rozsahu posuvů

U tohoto měření byly měřeny složky řezných sil v rozsahu posuvu f_{z1} , f_{z2} a f_{z3} . Výsledky jsou uvedeny v tabulce 5.4. Pro grafické znázornění dosažené výsledné síly F_v u VBD při posuvech f_{z1} , f_{z2} a f_{z3} geometrie -M byl sestaven graf 5.6.

Tab. 5.4 Výsledky řezných sil VBD geometrie -M z rozsahu posuvů f_{z1} , f_{z2} a f_{z3}

RCMT 10T3MOSN-M-P01; M8310			
Parametr	$f_{z1} = 0,15 \text{ mm}$	$f_{z2} = 0,3 \text{ mm}$	$f_{z3} = 0,45 \text{ mm}$
$F_{t \max} = F_x$	141 N	235 N	327 N
$F_{n \max} = F_y$	64 N	76 N	88 N
$F_{z \max} = F_z$	179 N	238 N	284 N
F_v	237 N	343 N	442 N
RYMX 1004-M; TT8080			
Parametr	$f_{z1} = 0,15 \text{ mm}$	$f_{z2} = 0,3 \text{ mm}$	$f_{z3} = 0,45 \text{ mm}$
$F_{t \max} = F_x$	162 N	261 N	359 N
$F_{n \max} = F_y$	84 N	112 N	131 N
$F_{z \max} = F_z$	199 N	265 N	317 N
F_v	270 N	388 N	497 N
RPHT 10T3MOT-X4; SP6519			
Parametr	$f_{z1} = 0,15 \text{ mm}$	$f_{z2} = 0,3 \text{ mm}$	$f_{z3} = 0,45 \text{ mm}$
$F_{t \max} = F_x$	139 N	228 N	321 N
$F_{n \max} = F_y$	62 N	82 N	104 N
$F_{z \max} = F_z$	123 N	166 N	202 N
F_v	196 N	294 N	393 N



Graf 5.6 Výsledná síla F_v u VBD při posuvech f_{z1}, f_{z2} a f_{z3} - geometrie -M

U druhého měření řezných sil s kruhovou VBD geometrie –M bylo zjištěno, že z hlediska funkčnosti a ekonomického hlediska byla nejpříznivěji vyhodnocena destička RPHT 10T3MOT-X4; SP6519. Tato VBD dosáhla nejnižších hodnot řezných sil i nejnižšího potřebného příkonu stroje při obrábění.

Závěr

Bakalářská práce byla zaměřena na měření řezných sil při kopírovacím frézování. Pro vlastní měření byly použity frézovací nástroje s kruhovými VBD – modulární hlavičky od společnosti Pramet Tools s.r.o. (označení: 25E3R032M12-SRC10-C-P01), výrobce 2 (označení: TERY 325-M12-10) a od výrobce 3 (označení: 7713VR10SA025Z3R35).

Měření řezných sil bylo rozděleno do dvou částí z hlediska použitých geometrií VBD. Pro měření byly použity VBD geometrie –F, které mají zaoblenou řeznou hranu bez fazetky, a geometrie –M se zaoblenou řeznou hranou s fazetkou. Obráběným materiálem byla zvolena uhlíková ocel ČSN 12 050.1 (C45), u které byly pomocí dynamometru KISTLER, typ 9265 A, měřeny řezné síly VBD. Obrobek o rozměrech 130x128x100 (mm) byl pro upnutí do držáku přizpůsoben z hlediska použitého dynamometru.

Při experimentálním měření byl použit piezoelektrický dynamometr firmy KISTLER, typ 9265 A. Zvolené řezné podmínky a výsledky měření jsou detailně zaznamenány v tabulkách kapitoly 4 a 5.

Vytipované nástroje a jejich VBD geometrie –F byly porovnávány při axiální hloubce řezu $a_p = 1,5$ mm a při posuvech na zub $f_{z1} = 0,1$ mm, $f_{z2} = 0,2$ mm a $f_{z3} = 0,3$ mm. Geometrie –M byly porovnávány při axiální hloubce řezu $a_p = 1,5$ mm a při posuvu na zub $f_{z1} = 0,15$ mm, $f_{z2} = 0,3$ mm a $f_{z3} = 0,45$ mm.

Výsledky měření byly graficky zpracovány a mohou být shrnuty v následujících bodech:

- u testování kruhových VBD geometrie –F dosáhla nejnižších hodnot řezných sil destička RPMT 10T3MOE-41-X4; SP6519 u všech posuvů na zub f_{z1} , f_{z2} a f_{z3} . Nejvyšších hodnot řezných sil dosáhla destička RYMX 1004-ML; TT8080. Rozdíl činil 19% až 27%,
- u testovaných kruhových VBD geometrie –F z hlediska naměřených hodnot příkonu stroje však dosáhla nejnižších hodnot destička RCMT 10T3MOEN-F; M8310. Nejvyšších hodnot příkonu stroje dosáhla opět destička RYMX 1004-ML; TT8080,
- u testování kruhových VBD geometrie –M dosáhla nejnižších hodnot řezných sil destička RPHT 10T3MOT-X4; SP6519 u všech posuvů na zub f_{z1} , f_{z2} a f_{z3} . Nejvyšších hodnot řezných sil dosáhla destička RYMX 1004-M; TT8080. Rozdíl činil 26% až 38%,

- u testovaných kruhových VBD geometrie –M z hlediska naměřených hodnot příkonu stroje dosáhla nejnižších hodnot destička RPHT 10T3MOT-X4; SP6519. Nejvyšších hodnot příkonu stroje dosáhla destička RYMX 1004-M; TT8080.

Ze závěrečného vyhodnocení vyplývá, že nejnižších hodnot řezných sil dosáhly destičky RPMT 10T3MOE-41-X4; SP6519 geometrie –F a u geometrie –M to byly destičky RPHT 10T3MOT-X4; SP6519, což značnou měrou ovlivňuje geometrie řezného nástroje, která u těchto destiček byla jako jediná pozitivně negativní $\gamma_p = +5^\circ$ a $\gamma_f = -5^\circ$. Naopak nejhorších výsledků dosáhly destičky RYMX 1004-ML; TT8080 geometrie –F a destičky RYMX 1004-M; TT8080 geometrie –M, které měly geometrii řezného nástroje negativně negativní $\gamma_p = -3^\circ$ a $\gamma_f = -10^\circ$.

Dosažené výsledky budou doporučeny pro návrh výroby budoucího sortimentu nástrojů pro kopírovací frézování společnosti Pramet Tools, s.r.o.

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Tomáši Zlámalovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky během zpracování bakalářské práce. Dále děkuji všem pracovníkům Pramet Tools, s.r.o., kteří se podíleli na této práci při praktických zkouškách. Velké díky patří panu Ing. Martinu Binderovi, Ph.D. za odborné rady a vstřícný přístup.

Použitá literatura

- [1] VIGNER, M., PŘÍKRYL, Z., a kol. *Obrábění: Technický průvodce, svazek 61*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1984. 808 s. ISBN 04-250-84
- [2] BRYCHTA, J., ČEP, R., NOVÁKOVÁ, J., PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II - 1. díl*. VŠB-TU Ostrava, 2007. 126 s. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [3] BRYCHTA, J., ČEP, R., NOVÁKOVÁ, J., PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II – 2. Díl*. VŠB-TU Ostrava, 2008. 150 s. ISBN 978-80-248-1822-1.
- [4] AB SANDVIK COROMANT. *Příručka obrábění: Kniha pro praktiky*. Praha: fa Sandvik CZ, s. r. o., 1997. 857 s. ISBN 91-97 22 99-4-6.
- [5] BRYCHTA J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění. E-learningové prvky pro podporu výuky odborných a technických předmětů*. 2007. Ediční středisko VŠB – TUO, 251 s. ISBN 978-80-248-1505-3. <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NSPO/>
- [6] SADÍLEK, M., DUBSKÝ, J. *Obrábění I: výběr přednášek*. VŠB-TU Ostrava, 2015, s. 137. ISBN 978-80-248-3857-1.
- [7] *Katalog frézování* 2014. PRAMET TOOLS, s. r. o., 2014. 340 s.
- [8] SANDVIK COROMANT [online]. *Směr frézování*: dostupné na: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/technologies/silent-tools/milling/programming_guidelines
- [9] SANDVIK COROMANT [online]. *Čelní frézování*: dostupné na: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/application_overview/face_milling/pages/default.aspx
- [10] SANDVIK COROMANT [online]. *Kopírovací frézování*: dostupné na: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/application_overview/profile_milling/contouring_or_copy_milling/pages/copy-milling.aspx
- [11] BUDA, J., VASILKO, K., SOUČEK, J., *Teória obrábania: celoštátna vysokoškolská učebnica pre strojnícke fakulty vysokých škôl*. 2., preprac. vyd. Bratislava: Alfa, 1988. Edícia strojárскеj literatúry (Alfa).
- [12] HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.

- [13] KOVOSVIT.MCV Line – vertikální obráběcí centra. [online]. [cit. 2016-1-5].
Dostupné na: <https://www.kovosvit.cz/mcv-1270-p9.html#technicaldata>
- [14] VALOŠEK, F., *Manuál ocelí*. Ostrava: Dům techniky Ostrava, spol. s r. o., 1993.
- [15] *Převodník materiálů*. PRECIZ, s.r.o., Materiál 1.1191 (C 45, 12050): dostupné na:
<http://www.preciz.cz/sluzby-hlavni/material-normal/1.1191#>
- [16] *Nové frézovací materiály*. PRAMET TOOLS, s. r. o.: dostupné na:
<http://mx.pramet.com/prolog/upgrade/#frezovani>
- [17] *Carbide Depot*. Kennametal/Stellram.: dostupné na:
<http://www.carbidedepot.com/kennametal.aspx>
- [18] *News and Technology from TaeguTec*. TaugeTec Times.: dostupné na:
http://www.taegutectimes.com/New_Products/TT8080/TT8080-CZ/tt8080-cz.html
- [19] HUMÁR, A. *Technologie I – technologie obrábění – sylabus*. Brno : VUT Brno, 2003
- [20] KOČMAN,K., PROKOP, J. *Technologie obrábění*. Brno: CERM, s. r. o. 2005. 270 s.
ISBN 80-214-3068-0.
- [21] SANDVIK COROMANT [online]. *PVD a CVD povlaky*: dostupné na:
https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/coated_cemented_carbide/pages/default.aspx#3

Seznam příloh

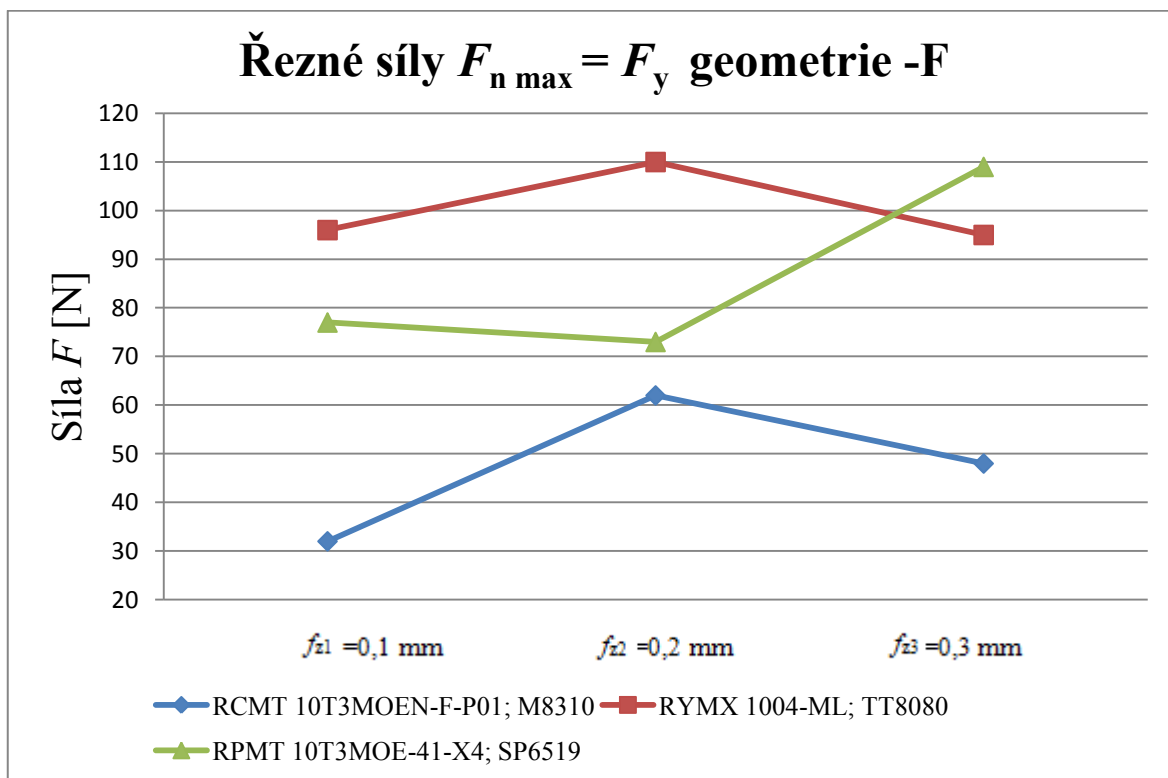
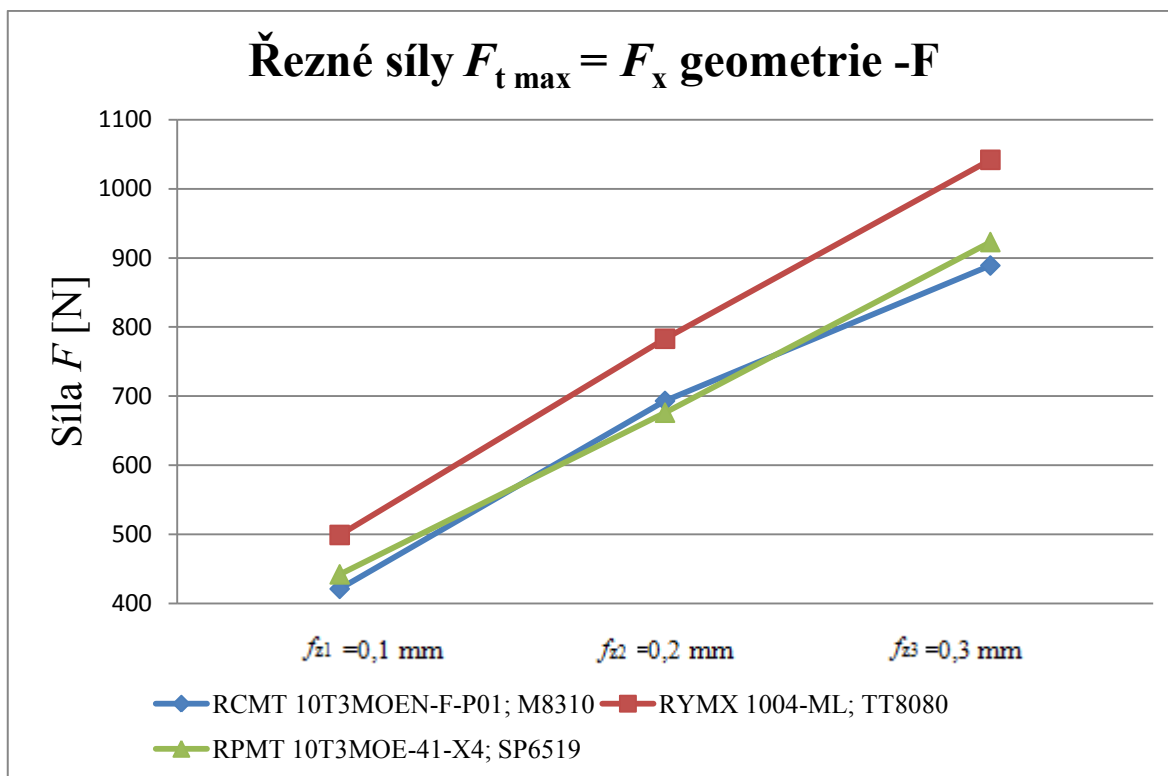
Příloha č. 1 - Grafické porovnání řezných sil $F_{t\max} = F_x$ (tangenciální složka síly), $F_{n\max} = F_y$ (normálová složka síly), $F_{z\max} = F_z$ (axiální složka síly) **geometrie -F z okamžiku $F_{t\max} = F_x$**

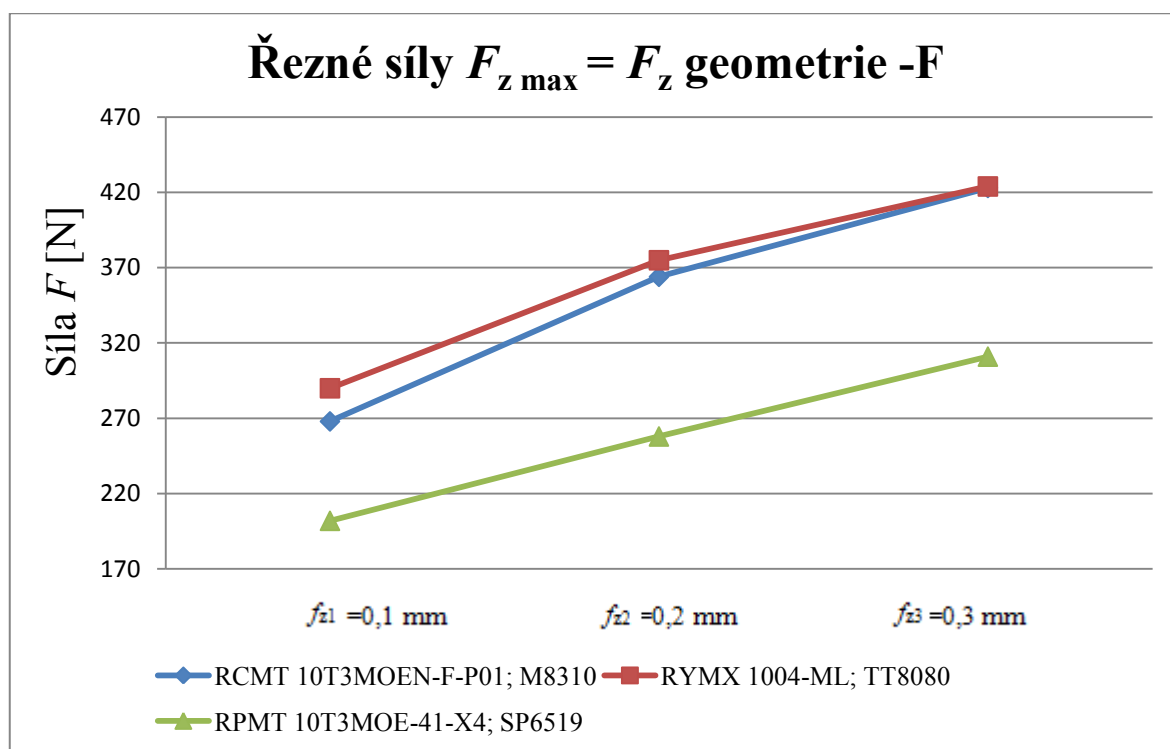
Příloha č. 2 - Grafické porovnání řezných sil $F_{t\max} = F_x$ (tangenciální složka síly), $F_{n\max} = F_y$ (normálová složka síly), $F_{z\max} = F_z$ (axiální složka síly) **geometrie -F z rozsahu posuvů f_{z1}, f_{z2} a f_{z3}**

Příloha č. 3 - Grafické porovnání řezných sil $F_{t\max} = F_x$ (tangenciální složka síly), $F_{n\max} = F_y$ (normálová složka síly), $F_{z\max} = F_z$ (axiální složka síly) **geometrie -M z okamžiku $F_{t\max} = F_x$**

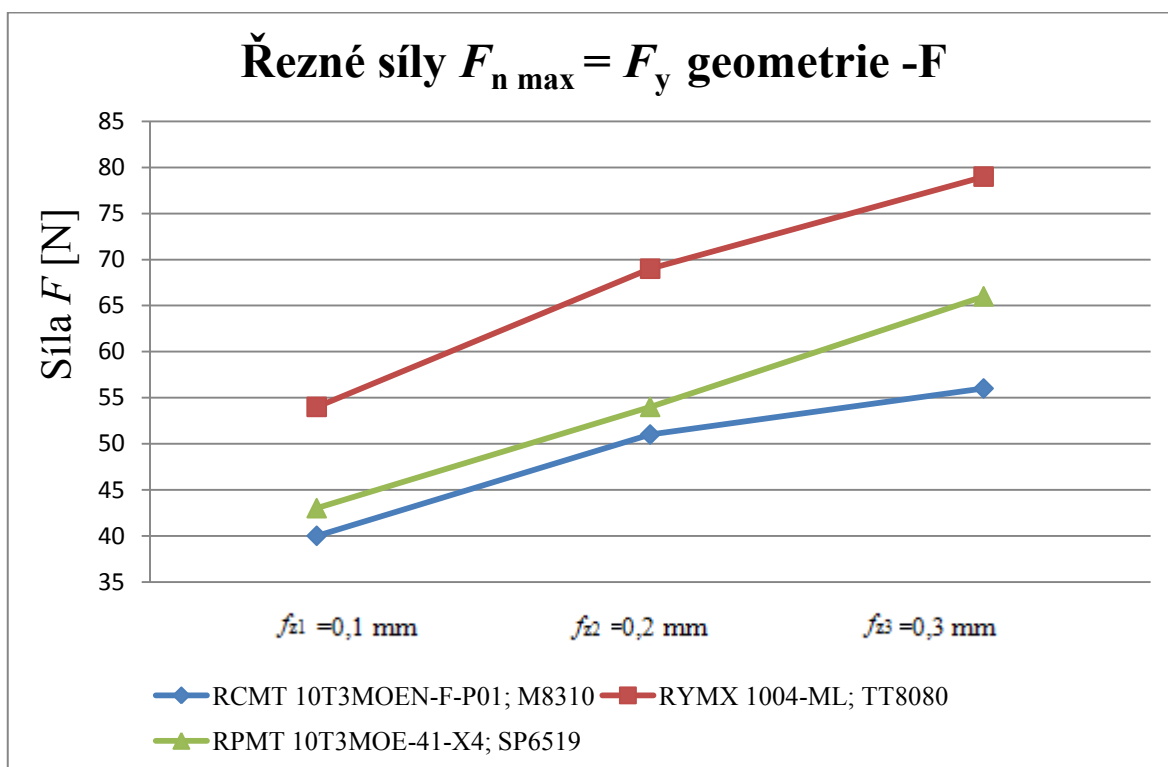
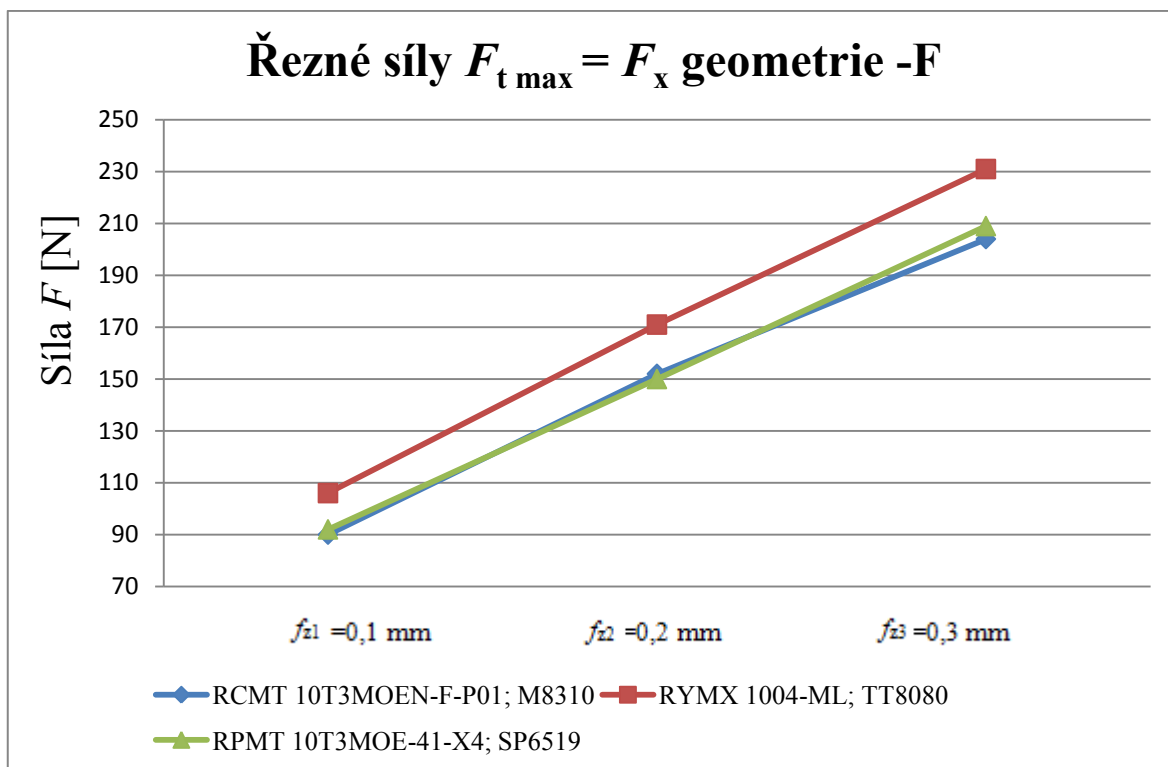
Příloha č. 4 - Grafické porovnání řezných sil $F_{t\max} = F_x$ (tangenciální složka síly), $F_{n\max} = F_y$ (normálová složka síly), $F_{z\max} = F_z$ (axiální složka síly) **geometrie -M z rozsahu posuvů f_{z1}, f_{z2} a f_{z3}**

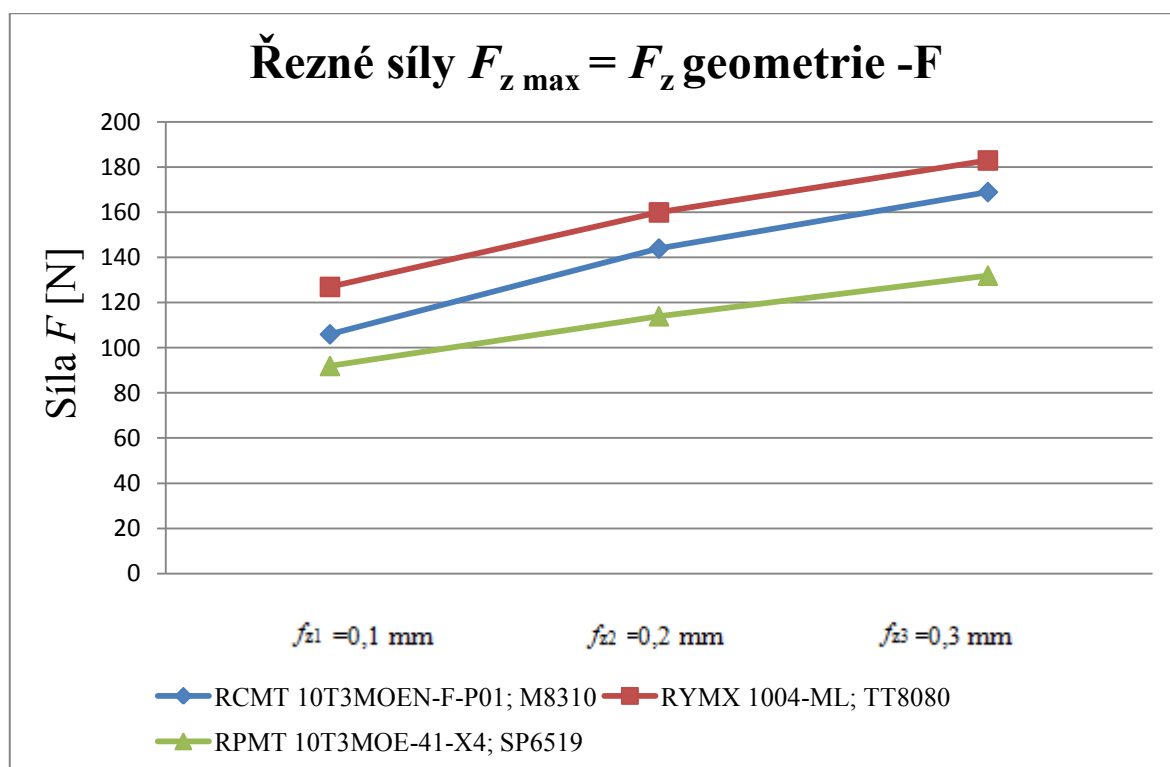
Příloha č. 1 - Grafické porovnání řezných sil $F_{t\max} = F_x$ (tangeční složka síly), $F_{n\max} = F_y$ (normálová složka síly), $F_{z\max} = F_z$ (axiální složka síly) **geometrie -F** z okamžiku $F_{t\max} = F_x$



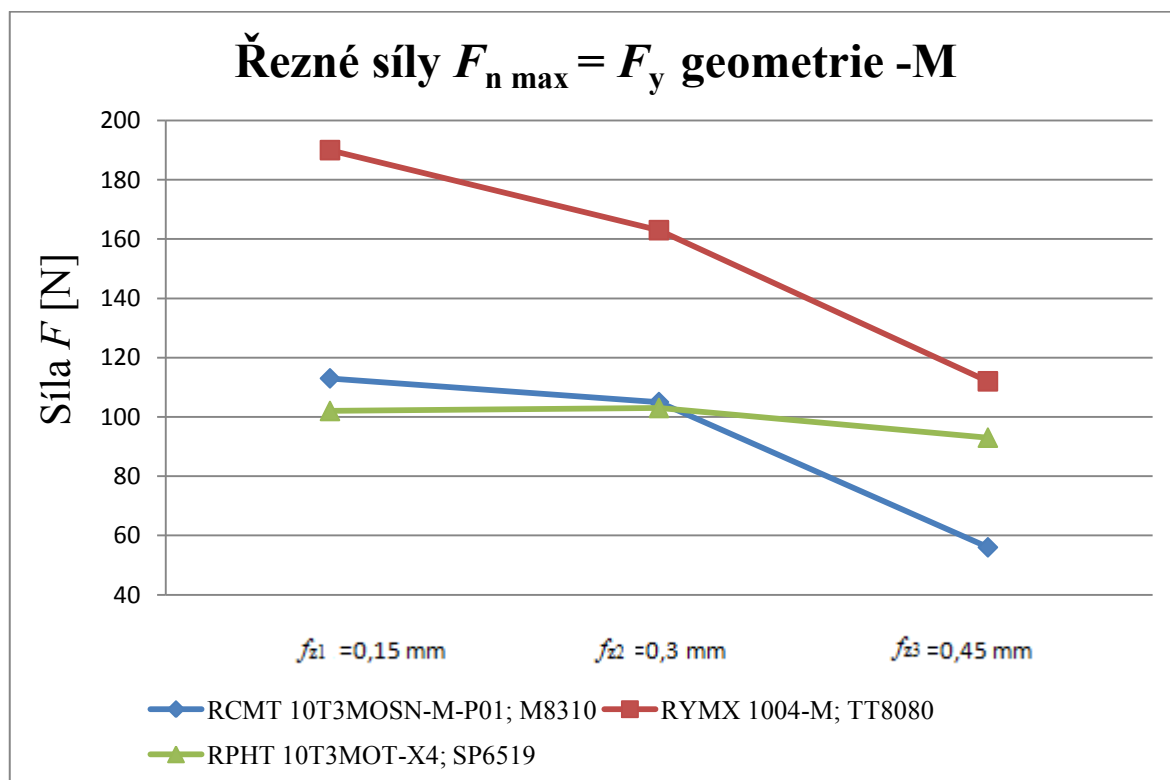
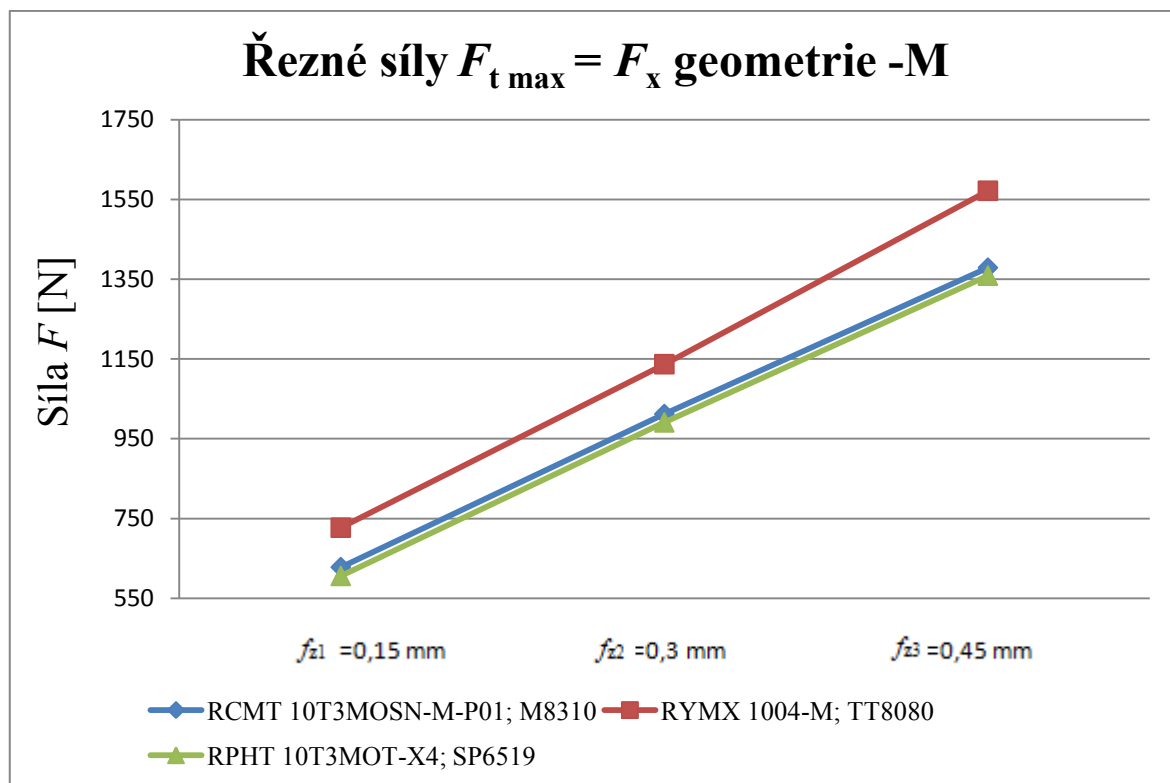


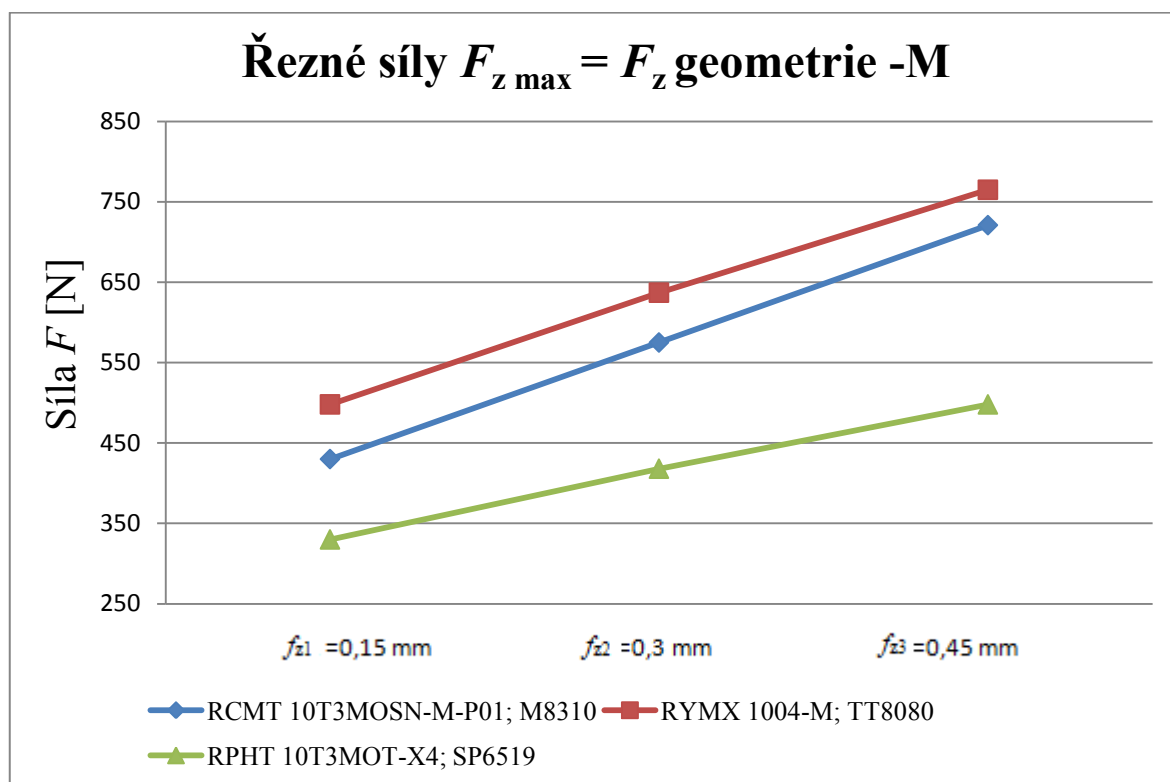
Příloha č. 2 - Grafické porovnání řezných sil $F_{t \max} = F_x$ (tangenciální složka síly), $F_{n \max} = F_y$ (normálová složka síly), $F_{z \max} = F_z$ (axiální složka síly) **geometrie -F** z rozsahu posuvů f_{z1} , f_{z2} a f_{z3}





Příloha č. 3 - Grafické porovnání řezných sil $F_{t\max} = F_x$ (tangenciální složka síly), $F_{n\max} = F_y$ (normálová složka síly), $F_{z\max} = F_z$ (axiální složka síly) **geometrie -M z okamžiku $F_{t\max} = F_x$**





Příloha č. 4 - Grafické porovnání řezných sil $F_{t \max} = F_x$ (tangenciální složka síly), $F_{n \max} = F_y$ (normálová složka síly), $F_{z \max} = F_z$ (axiální složka síly) geometrie -M z rozsahu posuvů f_{z1} , f_{z2} a f_{z3}

